

**TULOILMALUUKKUIJEN SÄÄTÄMINEN LÄMPÖTILAN MUKAAN**  
**CASE: VIIKIN OPETUS- JA TUTKIMUSTILAN NAVETTA**

**Pro gradu**

**Ari Kuiri**

**Helsingin yliopisto**  
**Maataloustieteiden laitos**  
**Helsinki 2010**

## Esipuhe

Tämän tutkimuksen rahoituksesta vastasi entinen Agroteknologian laitos. Tutkimuksen ohjaamisesta ja neuvonnasta vastasivat professori Jukka Ahokas ja yliopistonlehtori Matti Pastell. Tutkimus tehtiin Viikin tutkimus- ja opetustilan pihatossa. Mittaukset tehtiin pääosin keväällä 2010.

Haluan kiittää Agroteknologian laitoksen henkilökuntaa kaikesta avusta tähän tutkimukseen liittyen. Kiitokset erityisesti yliopistonlehtori Mikko Hautalalle, jonka neuvojen ansiosta lopulliset mittaukset pääsivät alkamaan.

Haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni kaikesta tuesta liittyen tähän työhön sekä opintojeni eri vaiheisiin.

Helsingissä 8.9.2010

Ari Kuiri

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty		Laitos Institution – Department	
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Maataloustieteiden laitos	
TekijäFörfattare – Author			
Kuiiri Ari Tapani			
Työn nimi Arbetets titel – Title			
Tuloilmaluukkujen säätäminen lämpötilan mukaan CASE: Viikin opetus- ja tutkimustilan navetta			
Oppiaine Läroämne – Subject			
Maatalousteknologia			
Työn laji Arbetets art – Level	Aika Datum – Month and year	Sivumäärä Sidoantal – Number of pages	
Pro gradu	Syyskuu 2010	64	
Tiivistelmä Referat – Abstract			
<p>Ilmanvaihdon toimivuus on Suomen oloissa erittäin tärkeää. Talvella tulisi poistaa haitalliset kaasut ja liika kosteus mutta pitää lämpötila kuitenkin eläimille siedettävällä tasolla. Kesäisin ilmanvaihdon pääkriteerinä on ylimääräisen lämmön poistaminen. Toimivalla ilmanvaihdolla parannetaan eläinten hyvinvointia sekä työntekijöiden työturvallisuutta ja työssä jaksamista.</p> <p>Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin tuloilmaluukkuja voidaan säätää sisä- ja ulkolämpötilaeron mukaan. Tavoitteena oli, että sisälämpötila ei ylittäisi 14 °C eikä alittaisi 12 °C. Tuloksia verrattiin alkuperäiseen säätöön, joka perustui puhaltimien kierrosnopeuteen. Tutkimus tehtiin Viikin opetus- ja tutkimustilan navetassa, jossa on alipaineilmanvaihto. Säättöjen aikana mitattiin lämpötiloja, hiilidioksidipitoisuus sekä suhteellinen kosteus. Luukkujen ohjaus toteutettiin logiikkaohjauksen avulla.</p> <p>Molemmissa säädöissä sisälämpötila pysyi tasaisena ja hiilidioksidipitoisuudet laskivat. Uudessa eli lämpötilaeroihin perustuvassa säädössä sisälämpötila pysyi lähempänä asetettujen rajojen. Alkuperäisessä eli pyörimisnopeuteen perustavassa säädössä lämpötila laski huomattavasti alle 12 °C. Tällöin käytössä oli vain toisen puolen luukkurivi, joten lämpötila olisi ollut vieläkin alempi, jos säätö olisi ollut täysin toiminnassa.</p> <p>Keskiarvoisesti molemmilla säädöillä päästiin lähelle minimilämpötilatavoitetta mutta hajonta oli suurempaa alkuperäisessä säädössä. Alkuperäinen säätö oli hieman liian tehokas pakkaskaudella, koska sisälämpötila laski lähelle 9 °C vaikka käytössä oli vain toisen puolen luukut. Uudella säädöllä päästiin lähelle 12 °C, kunhan vain molempien puolien luukut olivat käytössä. Ulkolämpötilan ollessa plussan puolella tai lähellä 0 °C ilmaa ei vaihdu tarpeeksi, jos käytössä on vain toisen puolen luukut. Tällöin sisälämpötila ja kaasupitoisuudet nousevat.</p> <p>Automaattisten säättöjen tulokset eivät ole täysin vertailukelpoiset, koska alkuperäisen säädön aikana vallitsivat kylmemmät sääolot. Silti voidaan olettaa, että uudella säädöllä olisi pysytty lähellä minimilämpötilatavoitetta myös kylmimpinä säillä. Koska uudella säädöllä päästiin lähelle 12 °C lämpimimmillä säillä, voidaan olettaa sen toimivan myös pakkasten aikaan. Tällöin luukkuja tarvitsee avata vähemmän päästäkseen tavoitelämpötilaan ja kovalla pakkasella riittää jo, että käytössä on vain toisen puolen luukut.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
Ilmanvaihto, tuloilmaluukku, lämpötilaero			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Helsingin Yliopisto, Maataloustieteiden laitos, Maatalousteknologian käsikirjasto			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos Institution – Department Department of Agricultural Sciences	
TekijäFörfattare – Author  Ari Tapani Kuiri			
Työn nimi Arbetets titel – Title Controlling air inlets based on the temperature CASE: Cowshed of Viikki Research farm			
Oppiaine Läroämne – Subject  Agricultural Engineering			
Työn laji Arbetets art – Level M.Sc. Thesis	Aika Datum – Month and year  September 2010	Sivumäärä Sidoantal – Number of pages  64	
Tiivistelmä Referat – Abstract  <p>In Finland it's important to have properly working ventilation system. Harmful gases and moisture should be removed from cowshed in winter while keeping indoor temperature in acceptable level for animals. In summer the main criterion for ventilation is removing extra heat. Working ventilation improves animal welfare and employee safety at work.</p> <p>The purpose of this research was to find out if it is possible to control the air inlets depending on the temperature difference. The aim was that indoor temperature doesn't fall below 12 °C or rise over 14 °C. Results were compared with another control system which is adjusting air inlets depending on the rotation speed of exhaust fans. Research was conducted in the cowshed of Viikki Research Farm which has under pressure ventilation system. Measurable quantities were carbon dioxide, moisture and temperatures. Adjusting of air inlets was carried out using programmable logic control.</p> <p>Indoor temperature remained stable in both control systems and content of carbon dioxide fell down. Indoor temperature remained between the target values better with the system operating based on temperature difference. With the other system the indoor temperature fell noticeably below 12 °C even though air inlet vents were closed on another side of cowshed. If both sides of air inlets would have been-used, the indoor temperature would have been even lower.</p> <p>Average temperatures were near 12 °C in both control systems but standard deviation was higher in the original system. The original control system was too effective because indoor temperature was near 9 °C when there was cold outside. With new adjusting system indoor temperature was near 12 °C if both sides of air inlets were used. If outdoor temperature was near 0 °C or higher and only one side of air inlets were use it was impossible to get enough fresh air in the cowshed. Therefore, if indoor temperature is higher than the target temperature then the content of carbon dioxide is also on high level.</p> <p>Results of control systems aren't directly comparable because weather was colder when measurements of original control system were done. Nevertheless it can be assumed that new control system would work also in colder weather.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords  ventilation, under pressure ventilation, air inlets, temperature difference			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited  Department of Agricultural Sciences, Faculty of Agriculture and Forestry			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

## Sisällys

<b>KÄSITTEET, LYHENTEET JA SYMBOLIT .....</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>8</b>
<b>2 KIRJALLISUUS .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Suomen ilmasto .....</b>	<b>9</b>
2.1.1 Lämpötila.....	9
2.1.2 Ilman kosteus .....	10
2.1.3 Tuuli .....	10
<b>2.2 Ilmanvaihdon määrittäminen .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Ilmanvaihtojärjestelmät .....</b>	<b>13</b>
2.3.1 Alipaineilmanvaihto .....	13
2.3.2 Ylipaineilmanvaihto .....	14
2.3.3 Tasapaineilmanvaihto.....	15
2.3.4 Luonnollinen ilmanvaihto.....	15
2.3.5 Tuloilmaluukut.....	17
2.3.6 Itkupinta.....	18
2.3.7 Puhaltimet.....	19
2.3.8 Säätlaitteet .....	20
2.3.9 Tuulen vaikutus.....	20
<b>2.4 Ilmanvaihdon merkitys .....</b>	<b>21</b>
2.4.1 Ilmanvaihdon ongelmat .....	21
2.4.2 Huonon ilmanvaihdon vaikutus lehtiin .....	22
2.4.3 Huonon ilmanvaihdon vaikutus hoitajiin ja navetan rakenteisiin .....	26
2.4.4 Minimi ilmanvaihtotarve .....	26
2.4.5 Maksimi ilmanvaihtotarve .....	28
<b>2.5 Aikaisemmat tutkimukset .....</b>	<b>29</b>
<b>3 TYÖN TAVOITTEET .....</b>	<b>30</b>
<b>4 AINEISTO JA MENETELMÄT .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 Koeolosuhteet .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2 Koejärjestelyt .....</b>	<b>32</b>
4.2.1 Ilmanvaihdon mitoitus.....	32
4.2.2 Sääntölogiikka .....	35
<b>4.3 Laitteet.....</b>	<b>40</b>
4.3.1 Olosuhteiden mittaus.....	40
4.3.2 Lämpötila-anturi.....	41
4.3.3 Hiilidioksidianturi .....	43
4.3.4 Kosteusanturi .....	44

<b>5</b>	<b>TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU .....</b>	<b>45</b>
<b>5.1</b>	<b>Alustavat mittaukset.....</b>	<b>45</b>
<b>5.2</b>	<b>Olosuhdemittausten tulokset.....</b>	<b>45</b>
5.2.1	Tulokset ilman automaattista säätöä.....	45
5.2.2	Tulokset alkuperäisen säädön aikana.....	47
5.2.3	Tulokset uuden säädön aikana .....	52
5.2.4	Yhteenveto tuloksista .....	57
<b>6</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>59</b>
	<b>LIITTEET.....</b>	<b>61</b>
	<b>LÄHTEET.....</b>	<b>63</b>

**KÄSITTEET, LYHENTEET JA SYMBOLIT**

$\Omega$	ohmi, resistanssin mittayksikkö
$\Phi_{iv}$	ilmanvaihdon mukana poistuva vapaa lämpö (W)
$\rho_s$	ilman tiheys sisäilman lämpötilassa (kg kuivaa ilmaa/m <sup>3</sup> )
A	aukkojen ala (ilmanvaihdossa) (m <sup>2</sup> )
c	suurin sallittu hiilidioksidi pitoisuus eläinsuojan ilmassa (l/m <sup>3</sup> )
$c_p$	ilman ominaislämpö (kJ/kg °C)
$c_u$	ulkoilman hiilidioksidi pitoisuus (l/m <sup>3</sup> )
g	maan vetovoima (m/s <sup>2</sup> )
$g_s$	rakennuksessa tapahtuva vesihöyryn muodostus (g/h)
$\Delta h$	harjan ja tuloilmaluukkujen korkeusero (m)
K	hiilidioksidin kehittymisnopeus (l/h)
$V_1$	tarvittava ilmanvaihto (m <sup>3</sup> /s)
V	tarvittava ilmanvaihto (m <sup>3</sup> /h)
RH	suhteellinen kosteus
$T_s$	sisälämpötila (K)
$T_u$	ulkolämpötila (K)
$t_s$	sisälämpötila (°C)
$t_u$	ulkolämpötila (°C)
$x_s$	sisäilman vesisisältö (g/kg)
$x_u$	ulkoilman vesisisältö (g/kg)

## 1 JOHDANTO

Suomen oloissa oikean ilmanvaihdon valinta navettaan on erittäin tärkeää. Talvella on tärkeää saada poistettua haitalliset päästöt mutta pitää lämpötila kuitenkin lehmille ja hoitajille sopivalla tasolla. Poistettavia päästöjä navetassa ovat hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>) sekä ammoniakki (NH<sub>3</sub>). Myös vesihöyryn muodostuminen voi olla ongelmallista rakenteiden kannalta, jos sitä ei saada poistettua rakennuksesta. Kesällä tärkeimmäksi kriteeriksi muodostuu ylimääräisen lämmön poistaminen navettarakennuksesta.

Suomessa yleisin ilmanvaihtojärjestelmä on alipaineilmanvaihto. Luonnollisen ilmanvaihdon käyttö on lisääntynyt navettarakentamisessa lisääntyneen tutkimuksen johdosta. Ilmanvaihtojärjestelmä riippuu myös navettatyypistä. Muita ilmanvaihtojärjestelmiä ovat ylipaine- ja tasapainoilmanvaihto.

Riittävällä ilmanpoistolla parannetaan tuotosta sekä eläinten terveydentilaa. Myös työturvallisuus ja työssä jaksaminen kasvavat hyvän ilmanvaihdon ansiosta. Hengitysteiden sairaudet olivat kolmanneksi yleisimpiä sairauksia tuotantorakennuksissa työskentelevien keskuudessa vuonna 2006 heti meluvammojen ja rasisairauksien jälkeen (Jolanki ym. 2008). Toimivalla ilmanvaihdolla pidennetään työkyvyn säilymistä ja vältetään suuremmissa määrin hengitysteiden sairauksilta.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa Viikin koetilan navettaan uusi automaattisesti toimiva tuloilmaluukkujen säätö. Säätö perustui sisä- ja ulkolämpötilaeroihin. Tuloilmaluukkujen ohjaus toteutettiin logiikkaohjauksen avulla. Navetassa oli ennen tutkimusta automaattinen säätö, joka perustui poistopuhaltimien kierrosnopeuteen. Poistopuhaltimet säättyivät sisälämpötilan mukaan.

Navetan olosuhteita mitattiin sekä vanhan että uuden automaattisen säädön aikana. Olosuhteet mitattiin myös silloin, kun käytössä ei ollut automaattista säätöä. Automaattisen säädön toimivuutta arvioitiin vertailemalla eri jaksojen olosuhteita toisiinsa.



## 2 KIRJALLISUUS

### 2.1 Suomen ilmasto

Suomi sijaitsee 60. ja 70. leveysasteen välissä. Suomen ilmastoa lämmittää eniten Atlantilta ja Barentsin mereltä Golf-virran lämmittämät ilmavirrat. Myös Itämeri lahtineen ja sisävesistöt lämmittävät Suomen ilmastoa. Suomi jaetaan viiteen eri ilmastovyöhykkeeseen (Kuva 1). (Ilmatieteenlaitos 2008)

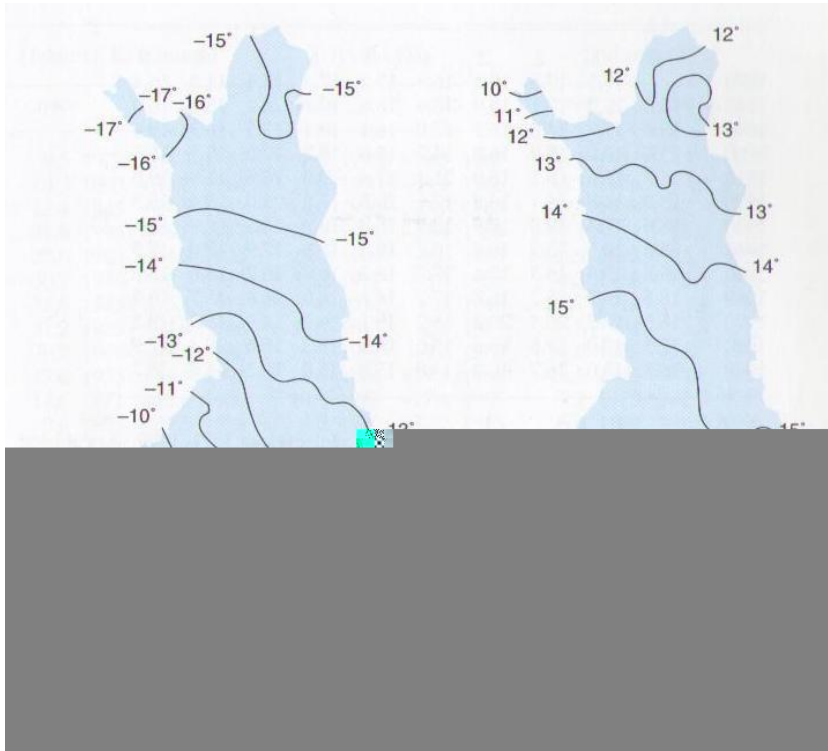
#### ILMASTOVYÖHYKKEET



Kuva 1. Suomen ilmastovyöhykkeet (Ilmatieteenlaitos 2008)

#### 2.1.1 Lämpötila

Kuvassa 2 on esitelty Suomen keskilämpötilat kesällä ja talvella. Kuten kuvasta näkyy, eri lämpötila-alueita on talvisin enemmän kuin kesäisin. Tämä voi vaikuttaa päätöksiin ilmanvaihtojärjestelmää valittaessa. Lisälämmön tarve on suurempaa pohjoisessa kuin etelässä. Siitä huolimatta myös Pohjois-Suomeen on rakennettu verhoseinäpihattoja.



Kuva 2. Suomen kuukausikeskilämpötila tammikuussa ja heinäkuussa (Karttunen ym. 2002)

### 2.1.2 Ilman kosteus

Ilman kosteudella tarkoitetaan ilman sisältämää näkymätöntä vesihöyryä. Suhteellinen kosteus (RH) kertoo, kuinka paljon ilma sisältää prosentteina vesihöyryä siitä määrästä mikä ilmassa voi korkeintaan olla vallitsevassa lämpötilassa.

Talvisin ilman suhteellinen kosteus on suurempi kuin kesäisin. Suurimmillaan suhteellinen kosteus on marras-joulukuussa ja pienimmillään touko-kesäkuussa (Kolkki 1969)

### 2.1.3 Tuuli

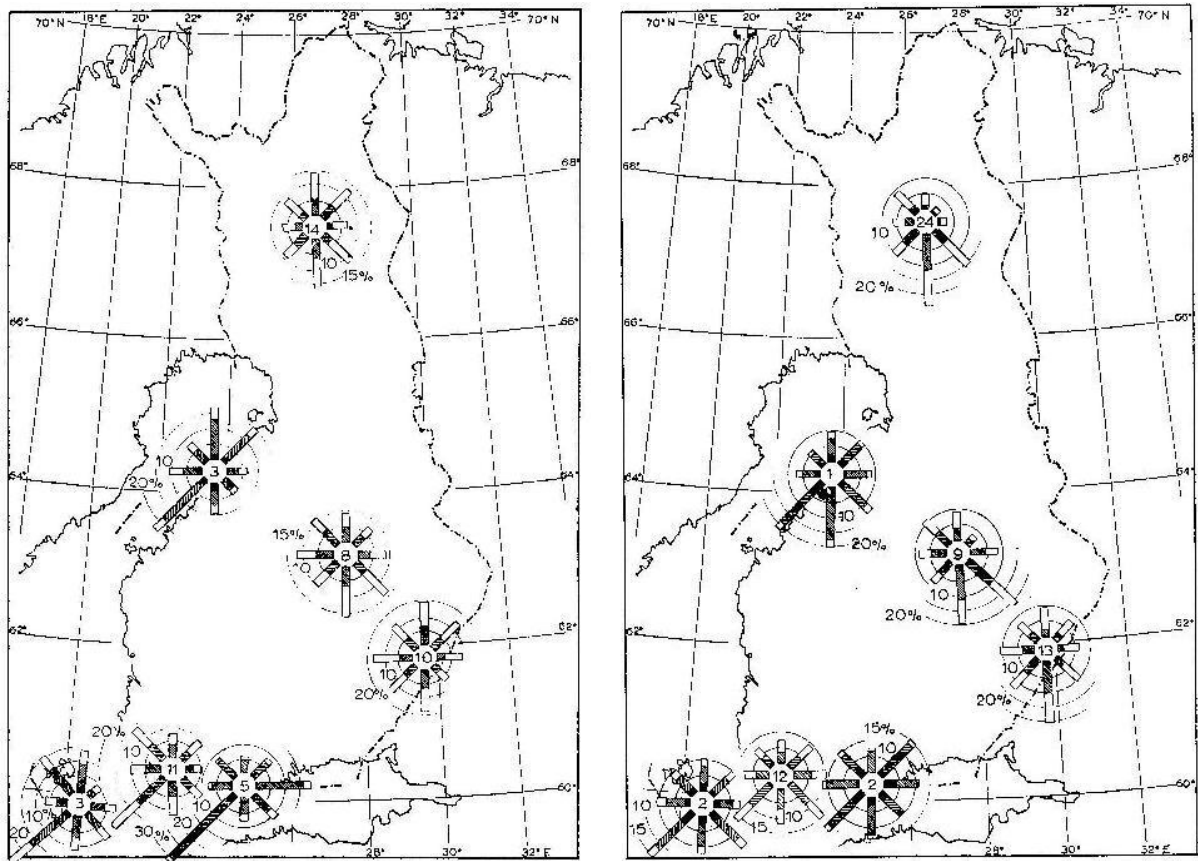
Tuuli on ilman liikettä, joka sisältää aina osittain pyörteitä. Suomessa yleisimmin tuulee lounaasta, mutta harvemmin koillisesta. Muista ilmansuunnista tuulee tasaisesti. Yleisin tuulen nopeus sisämaassa on keskimääräisesti 3-4 m/s, rannikoilla hieman enemmän (Ilmatieteenlaitos 2008). Taulukossa 1 on esitelty tuulen nopeudet ja vaikutukset luonnossa.

**Taulukko 1. Tuulen nopeus ja vaikutus luontoon (Kolkki 1969)**

Tuulen nopeus m/s	Tuulen nimitys	Tuulen vaikutukset	
		maalla	avomerellä
Vähemmän kuin 0,3	Tyyri	Savu nousee pystysuoraan	Peilityyni meri
0,3 - 1,5	Hiljainen tuuli	Tuulen suunnan näkee savun liikkeistä. Tuuliviiri ei käänny	Meren pinnassa pientä karettä
		Tuuli tuntuu ihoon. Puiden lehdet kahisevat. Tavallinen viiri kääntyy	Lyhyitä aaltoja, jotka eivät murru
1,6 - 3,3	Heikko tuuli		
3,4 - 5,4	Heikonlainen tuuli	Puiden lehdet ja lehvät liikkuvat. Kevyt lippu suoristuu	Aallon harjat murtuvat silloin tällöin. Läpinäkyvää vaahtoa aallon harjalla
	Kohtalainen tuuli	Pienet oksat heiluvat. Nostaa maasta pölyä ja irtonaisia paperin paloja	Pitkähköjä aaltoja. Vaahtopäitä, jotka kolahtelevat
5,5 - 7,9			
	Navakka tuuli	Pienehköt lehtipuut heiluvat. Järvenselällä vaahtopäitä	Aallon harjat kauttaaltaan valkoisina vaahtopäinä. Meri kohisee jatkuvasti
8,0 - 10,7			
	Kova tuuli	Suuret oksat heiluvat. Suhisee sattuessaan taloihin ja kiinteisiin esineisiin	Aaltojen vaahto leviää. Meri kohisee komeasti
10,8 - 13,8			
13,9 - 17,1	Luja tuuli	Puut heiluvat. Vasten tuulta kulkeminen vaikeata	Aaltojen huiput murtuvat. Vaahto järjestyy tuulen suuntaisiksi juoviksi. Kohina kuuluu kauas
17,2 - 20,7	Myrskyinen tuuli	Katkoo puiden oksia. Ulkona liikkuminen vaikeata	Aallot pitkiä ja verraten korkeita. Vaahto tiheinä tuulen suuntaisina juovina
20,8 - 24,4	Myrsky	Katkoo puita. Vaurioittaa heikohkoja rakennuksia, irrottaa kattotiiliä ja särkee savupiippujen hattuja	Aallot korkeita. Aaltojen pärske huonontaa hiukan näkyvyyttä. Meri pauhaa
24,5 - 28,4	Kova myrsky	Kiskoo puita juurineen. Aiheuttaa huomattavia vahinkoja rakennuksille. Sattuu harvoin sisämaassa	Aaltovuoria. Merenpinta valkoisena vaahtosta. Pauhu kovaa, puuskittaista. Aaltojen pärske huonontaa näkyvyyttä
28,5 - 32,6	Ankara myrsky	Kaataa metsää. Siirtää rakennuksia. Sattuu erittäin harvoin sisämaassa	Näköpiirissä olevat laivat katoavat aaltovuorien taakse. Koko merenpinta valkoisena. Pärske huonontaa huomattavasti näkyvyyttä
Enemmän kuin 32,7	Hirmumyrsky	Tuhoaa perinpohjin rakennuksia ym.	Koko merenpinta valkoisena. Näkyys erittäin huono

Tuulioloja kuvataan yleensä ns. tuuliruusujen avulla. Ne koostuvat eri tuulensuuntiin osoittavista pylväistä, joiden pituus ilmoittaa tuulen lukuisuuden prosentteina. Tuuliruusuihin piirretyt ympyrät esittävät prosenttiasteikkoa 5 prosenttiyksikön välein. Mustat pylväät

kuvaavat kovien tuulien, viivoitetut kohtalaisten ja valkoiset heikkojen tuulien määriä. Tuuliruusun keskellä oleva luku ilmoittaa tyynien tapauksien osuutta. Kuvassa 3 on esitelty tuulioloja ympäri Suomea kesällä ja talvella. (Kolkki 1969)



Kuva 3. Suomen tuulijakautumat (%) kesällä (vasen) ja talvella (Kolkki 1969)

## 2.2 Ilmanvaihdon määrittäminen

Ilmanvaihdolla tarkoitetaan raikkaan ilman tuontia rakennukseen, haitallisten kaasujen poistoa ja lämpötilan hallintaa. Ilmastoinnilla tarkoitetaan, että tuloilmaa käsitellään lämmittämällä, jäähdyttämällä, kostuttamalla, kuivattamalla tai puhdistamalla (Seppänen 1996). Navetan ilmanvaihdossa on harvoin mukana ilmastointia.

Ilmanvaihto voi toimia joko laimennus- tai laminaariperiaatteella. Laminaarivirtausperiaatteessa puhdas ilma työntää edellään likaista ilmaa. Tämä vaihtoehto ei sovellu tuotantorakennuksiin, koska se vaatii noin 15 kertaista ilmanvaihdon verrattuna tarvittavaan maksimaaliseen ilmanvaihtoon. Lisäksi tuloilma olisi aivan liian kylmää talvisin eikä

taloudellisista syistä sen lämmittäminen olisi järkevää. Laminaariperiaatetta ilmanvaihdossa käytetään sairaaloiden leikkaussaleissa ja muissa vastaavissa, joissa hygieniatason on oltava huippuluokkaa. (Karhunen ja Tuunanen 1986)

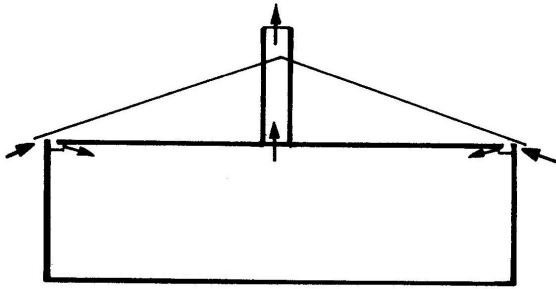
Laimennusperiaatteessa kylmempi ulkoilma sekoittuu lämpimämpään sisäilmaan. Sekoittuminen tapahtuu ilman liikkeestä johtuvan pyörteilyn ansiosta. Tuloaukon muoto, mitoitus ja ilman virtausnopeus vaikuttavat sekoittumisnopeuteen. Sekoittuminen on siis sitä tehokkaampaa mitä suurempaa ilman virtausnopeus on ja mitä pienempi tuloaukko on. (Karhunen ja Tuunanen 1986)

## **2.3 Ilmanvaihtojärjestelmät**

Ilmanvaihto voidaan jakaa koneelliseen ja luonnolliseen ilmanvaihtoon. Koneellinen ilmanvaihto jaetaan edelleen ali- ja ylipaineilmanvaihtoon sekä tasapaineilmanvaihtoon. Koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä muodostuu ilma-aukoista, puhaltimista sekä säätölaitteista. Luonnollinen ilmanvaihtojärjestelmä koostuu samoista paitsi että puhaltimet puuttuvat.

### **2.3.1 Alipaineilmanvaihto**

Alipaineilmanvaihdossa (Kuva 4) rakennukseen tuotetaan koneellisesti alipaine. Tämä tapahtuu esim. katon harjalle sijoitetuilla poistopuhaltimilla. Alipaineen johdosta uutta puhdasta ilmaa työntyy rakennuksen sisään tuloilma-aukoista, jotka on yleensä asennettu seinän ja katon rajaan (Bruce 1999). Alipaineilmanvaihto on yleisin vaihtoehto lypsykarjarakennuksissa Suomen olosuhteissa. Sen etuja ovat ilman tuloaukkojen helppo ohjaaminen ja alhainen sähkönkulutus tasapaineilmanvaihtoon verrattuna. Myös rakennuskustannukset ovat pienemmät alipaineilmanvaihdossa verrattuna tasapaineilmanvaihtoon.

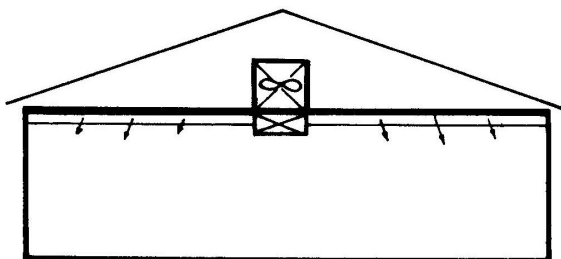


**Kuva 4. Alipaineilmanvaihdon periaate (Svedinger 1984)**

Alipaineilmanvaihdon haittapuolena on, etenkin talvisin, kosteuden muodostuminen tuloaukkojen kohdalle (Bruce 1999). Kosteus vaurioittaa pidemmällä aikavälillä puurakenteita sekä saa aikaan korroosiota metallirakenteissa. Tähän ongelmaan on ratkaisuna ”itkupinta”, jossa tuloaukkojen eteen tulee pelti, johon kosteus kondensoituu (Kuva 11). Tämä vähentää myös lehmien kohdistuvaa vetoa ja lämmittää tuloilmaa. Tuloilma lämpenee vesihöyryn höyrystymislämmön vapauduttua tiivistymistapahtumassa (Karhunen 1994). Vedontunne vähenee, koska ”itkupinta” ohjaa ilmaa, niin ettei se valu suoraan eläimien tasolle.

### 2.3.2 Ylipaineilmanvaihto

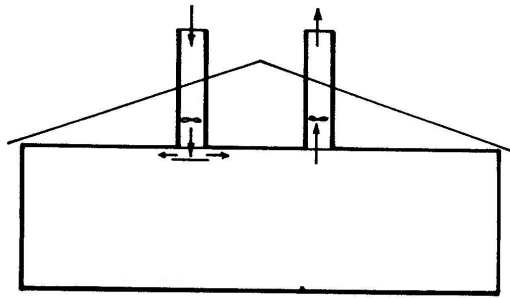
Ylipaineilmanvaihdossa (Kuva 5) rakennukseen tuotetaan koneellisesti ylipaine. Tässä vaihtoehdossa tuloilmaa imetään rakennukseen puhaltimilla. Koska rakennukseen tulee ylipaine, huono ilma poistuu poistoaukoista. Puhaltimet voivat olla asennettuna joko seinille tai kattoon. Ylipaineilmanvaihdon hyvänä puolena on alhainen sähkönkulutus verrattuna tasapaineilmanvaihtoon, koska puhaltimia on vähemmän. Huonona puolena on tuulenvaikutus tuloilman muotoon, jos puhaltimet on asennettu seinille. Suurimpana ongelmana on kosteuden pääseminen rakenteisiin. (Bruce 1999)



**Kuva 5. Ylipaineilmanvaihdon periaate (Svedinger 1984)**

### 2.3.3 Tasapaineilmanvaihto

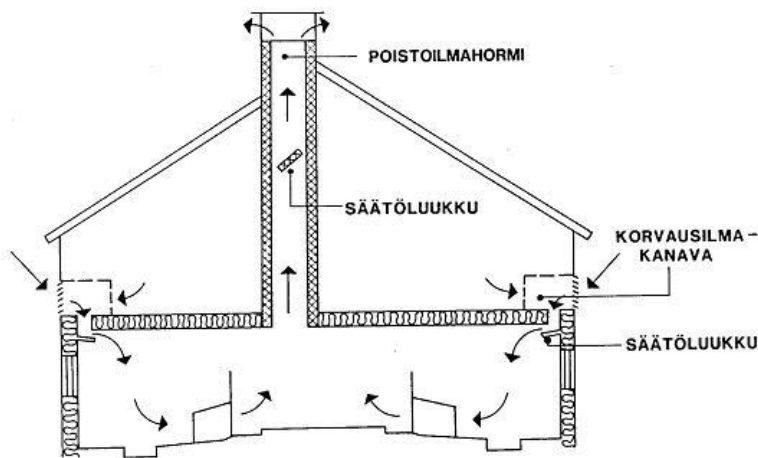
Tasapaineilmanvaihdossa (Kuva 6) rakennuksessa ylläpidetään tasainen ilmanpaine puhaltimien avulla. Sekä poisto- että tuloilma hoidetaan koneellisesti. Sisään tulee yhtä paljon ilmaa kuin sitä poistuu. Tasapaineilmanvaihdon hyvänä puolena on, että tuulen vaikutus puhaltimiin on vähäistä. Huonona puolena on hinta sekä sähkönkulutus, joka voi olla jopa kaksinkertaista verrattuna ali- ja ylipaineilmanvaihtoon. (Bruce 1999)



Kuva 6. Tasapaineilmanvaihdon periaate (Svedinger 1984)

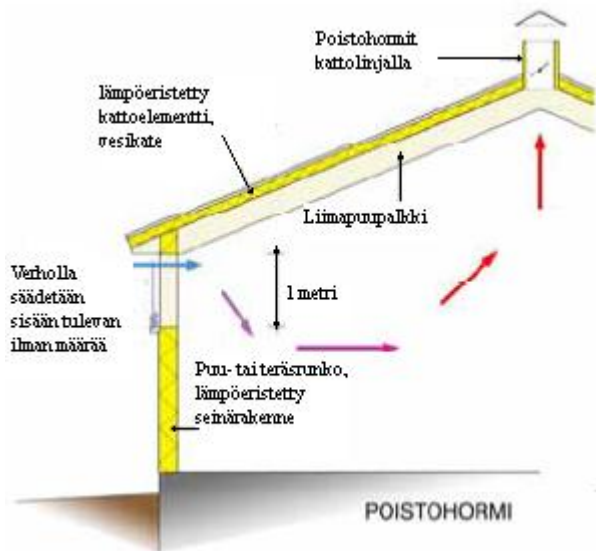
### 2.3.4 Luonnollinen ilmanvaihto

Luonnollinen ilmanvaihto perustuu sisä- ja ulkoilman lämpötila eroihin (Bruce 1999). Lämmin sisäilma on kevyempää kuin kylmä ulkoilma, joten se nousee katon harjalle ja poistuu poistoilma-aukoista. Ulkoilma on raskaampaa ja painuu sisälle tullessaan eläinten tasolle kunnes lämpenee tarpeeksi ja poistuu pois (Kuva 7) (Anon 1987).



Kuva 7. Luonnollisen ilmanvaihdon periaate (Anon 1987)

Luonnollinen ilmanvaihto on meluton vaihtoehto, koska siinä ei ole käytössä puhaltimia. Verhoseinään perustuva ilmanvaihto on yksi esimerkki luonnollisesta ilmanvaihdosta (Kuva 8). Siinä tuloilma-aukkoja säädetään keveiden verhojen avulla. Myös harjalla sijaitsevat poistoluukut tai -hormit ovat yleensä säädettävissä. Luonnollisessa ilmanvaihdossa voidaan ilmanvaihdon tarve laskea kaavalla 1 (Albright 1990).



Kuva 8. Lämpöeristetty verhoseinäpihatosta, jossa hormipoisto (Heikkinen ym. 2006)

$$V = 2A \sqrt{g \Delta h \frac{T_s - T_u}{T_s}} \quad (1)$$

jossa,

$V$ = tarvittava ilmanvaihto,  $\text{m}^3/\text{s}$

$A$ = aukkojen ala,  $\text{m}^2$  (pienemmän mukaan)

$g$ = maan vetovoima, ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ )

$\Delta h$ = harjan ja tuloilmaluukkujen korkeusero,  $\text{m}$

$T_s$ = sisälämpötila,  $\text{K}$

$T_u$ = ulkolämpötila,  $\text{K}$



### 2.3.5 Tuloilmaluukut

Tuloilma-aukkojen pinta-ala tulisi olla neliösenttimetreissä saman verran kuin maksimi-ilmanvaihto kuutiometrejä tunnissa (Anon 1987). Eläinten kannalta ilman virtaus tuloilma-aukoista eläinten tasolla saisi olla 0,2 m/s luokkaa. Tuloilmaluukut tulisi suunnata niin, että kylmä ulkoilma ehtisi lämmitä ennen kuin se kohtaa eläimen. Kesäisin suuntaamalla ilmavirta eläimiin saadaan tehokkaampi viilennys.

Tuloilmaluukut voidaan asentaa joko kattoon (Kuva 9) tai suoraan seinään (Kuva 10). Kattoon asennettaessa alipaineilmanvaihdossa tuloilmaluukut tulevat yleensä sivuseinien ja katon rajapintaan, koska poistopuhaltimet tulevat navetan katon harjalle. Seinälle asennettujen tuloilmaluukkujen ongelmana on alttius tuulen vaikutukselle. Tuulisella alueella tuuli voi sekoittaa ilmanvaihdon niin, että pahimmassa tapauksessa ilma tulee sisään tuulenpuoleiselta seinältä ja toisen seinän luukut toimivat poistoaukkoina (Karhunen ja Tuunanen 1986).



**Kuva 9. Kattoon asennettava tuloilmanluukku (Pellonpaja 2008)**



**Kuva 10. Seinään asennettava tuloilmanluukku (Pellonpaja 2008)**

Tuloilmaluukkuja voidaan säätää joko manuaalisesti tai automaattisesti. Luukkuja olisi hyvä pystyä säätämään samanaikaisesti, siksi saman seinänpuoleiset luukut ovat yleensä kytketty toisiinsa kiinni (Karhunen ja Tuunanen 1986). Talvella kostean ilman määrää tuloilmassa voidaan vähentää tuloilmaluukkujen eteen asennettavan itkupinnan avulla.

### 2.3.6 Itkupinta

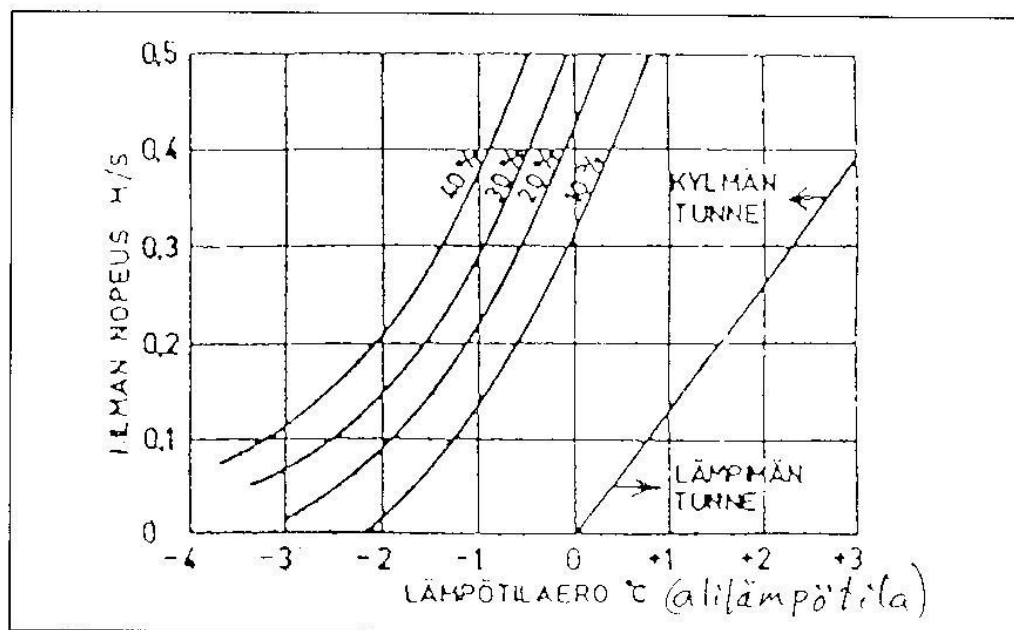
Itkupinnan toiminta perustuu kylmän ilman kosteuden kondensoitumiseen alumiinipeltiin eli se muuttuu vedeksi kohdatessaan itkupinnan. Itkupinta lämmittää myös tuloilmaa ja vähentää vedontuntoa lehmiin, koska tuloilma ei kohdistu suoraan lehmiin. Ilman lämpeneminen johtuu vesihöyryn tiivistymistapahtumassa vapautuvasta höyrystymislämmöstä. (Karhunen 1994)

Itkupinta asennetaan tuloilmaluukkujen eteen (Kuva 11). Itkupinta on usein aallotettua alumiinilevyä, josta vesi tippuu kouruun, joka johdattaa veden pois. (Karhunen 1994) Vakolan tekemien tutkimuksien mukaan itkupinnan ansiosta lämpötila nousee 1 - 1,5 °C minimi-ilmanvaihdon aikana. Myös haitallisten kaasujen ja pölyhiukkasten pitoisuudet laskevat itkupinnan ollessa asennettuna navettaan. Hiilidioksidipitoisuus pienenee 24 % ja suhteellinen kosteus laskee 4,1 prosenttiyksikköä. (Karhunen 1994)



**Kuva 11. Itkupinta tuloilmaluukkujen eteen asennettuna (Pellonpaja 2008)**

Myös vedontunne alenee 37 – 46 %. Vedontunne on saatu alilämpötilasta eli eläimeen kohdistuvan ilman lämpötilan ja käytävällä vallitsevan lämpötilan erotuksesta. Lisäksi mitataan ilman nopeus lehmien utareen puolelta 5-10 cm korkeudelta lattiasta. Kuvasta 12 katsotaan mitatun ilman nopeuden ja lasketun lämpötilaeron kohdalta vastaava vedontunnetta kuvaava prosenttiluku. (Karhunen 1994)



Kuva 12. Vedontunnetta kuvaavat prosenttiluvut ilman nopeudesta ja lämpötilaerosta (Karhunen 1994)

### 2.3.7 Puhaltimet

Puhaltimien tehtävä alipaineilmanvaihtojärjestelmässä on saada aikaan riittävän suuri alipaine navettarakennukseen, joka tavallisesti on 60 Pa (Karhunen ja Tuunanen 1986). Puhaltimien tulisi olla riittävän kokoisia verrattuna navetassa olevaan karjamäärään. Maa- ja metsätalousministeriön antamien suositusten mukaan yhtä lehmää kohden maksimi-ilmanvaihdon tulisi olla 310–360 m<sup>3</sup>/s (Taulukko 2).

Taulukko 2. Lypsykarjan lämmön- ja kosteudentuotto sekä olosuhdevaatimukset (MMM)

Eläin	Paino kg	Eläinten ikä kk	Suositus- lämpötila °C	Suht. Kost:n max- %	Lämmön- luovutus W/el.	Kosteuden luovutus g/h	Ilmanvaihto m <sup>3</sup> /h	
							min.	max.
Lypsylehmä	400..500		12	85	700	400	55	310
- " -	600		12	85	800	450	65	330
- " -	700		12	85	850	500	70	360
Hieho ja ummessa oleva lehmä	500		12	85	600	400	50	240
Nuorkarja, uudistus	400	18	12	85	500	300	40	200
- " -	300	9	12	85	400	250	30	150
- " -	150	5	12	85	250	150	20	100
Vasikka	75	2	12	85	100	75	10	55

Ilmanvaihtojärjestelmässä suurin sähkönkulutus tulee juuri puhaltimilta. Etenkin kesäisin, maksimi-ilmanvaihdon aikaan, puhaltimet pyörivät lähes jatkuvasti täysillä. Puhaltimien

mallit, siitä miten ne on asennettu ja niiden lukumäärä vaikuttavat paljon energian kulutukseen ja ilmanvaihdon toimivuuteen. Säätolaitteiden energiankulutus on vähäistä verrattuna puhaltimien kulutukseen.

### **2.3.8 Säätolaitteet**

Tuloilmaluukkuja ja poistopuhaltimia säädetään usein automaatiikan avulla. Navettarakennuksessa on useita lämpöantureita, joiden perusteella tuloilmaluukkujen asentoa säädetään. Myös puhaltimien kierrosnopeutta säädetään usein sisäilman lämpötilan mukaan.

Tuloilmaluukkujen asentoa säädetään usein automaattisesti erilaisten moottorien avulla. Vetomoottori saa jänniteviestin antureilta siitä, pitääkö luukkuja avata tai sulkea ja kuinka paljon. Luukut voi olla sidottu kiinni esimerkiksi vaijeriin, jota vetomoottori kiristää tai löysää tarpeen mukaan. Kiristäessä luukut sulkeutuvat ja löysätessä avautuvat.

Navetan olosuhteita voidaan mitata lämpötila-, kosteus- ja hiilidioksidiantureilla. Yleisimmin navetassa säädöt tapahtuvat lämpötilan mittauksen perusteella. Tällöin ei välttämättä saada poistettua kaikkia haitallisia kaasuja. Hiilidioksidipitoisuuden mukaan tehtävä säätö poistaa tarkemmin haitalliset kaasut. Tällöin navetan lämpötila laskee hieman normaalista, mikä ei kuitenkaan ole ongelma eläimille vaan pikemminkin hoitajien viihtyisyydelle. Toisaalta myös navetan tyyppi vaikuttaa myös siihen kuinka kylmä sisällä voi olla. Lypsyrobotti ei siedä pakkasta ja myös lietelantajärjestelmässä tulee ongelmia toimivuuden suhteen. Tällöin tulee lisälämmön käyttö tarpeen.

### **2.3.9 Tuulen vaikutus**

Tuulella on vaikutusta niin koneelliseen kuin myös luonnolliseen ilmanvaihtoon. Koneellisen ilmanvaihdon kannalta tuuli on pelkästään häirtatekijä (Sariola 1994). Kesällä tuulella on viilentävä vaikutus ja se tehostaa ilmanvaihtoa etenkin luonnollisessa ilmanvaihdossa. Tuuli voi myös aiheuttaa sen, että tuulen puoleinen navetan seinä toimii normaalisti tuloilmaluukkuina, mutta toinen puoli poistoluukkuina (Karhunen ja Tuunanen 1986).

Puhaltimissa voi aiheutua ongelmia tuulen vuoksi, jos ne on asennettu seinälle. Puhaltimet voivat pahimmassa tapauksessa ylikuumeta ja pysähtyä kokonaan (Sariola 1994). Siksi

puhaltimet yleensä asennetaankin navetan katolle. Kovalla tuulella luukut voivat myös paukkua kiinni ja auki, jos niihin ei ole rakennettu mitään vaimennusjärjestelmää.

## **2.4 Ilmanvaihdon merkitys**

Ilmanvaihdon kolmena päätarkoituksena voidaan pitää ylimääräisen lämmön poistamista, muodostuvan vesihöyryn poistamista sekä haitallisten kaasujen pitämistä alarajoissa (Karhunen ja Tuunanen 1984). Ilmanvaihdon mitoittaminen perustuu yleensä juuri edellä mainittuihin kolmeen seikkaan.

Ilmanvaihdon tärkeimmät osatekijät ovat fysikaaliset, kemialliset ja biologiset tekijät. Fysikaalisia tekijöitä ovat ilman lämpötila, liike ja suhteellinen kosteus. Kemiallisia tekijöitä ovat eri kaasujen pitoisuudet ilmassa. Näitä kaasuja ovat ammoniakki, metaani, hiilidioksidi ja rikkivety. Biologisia tekijöitä ovat ilmassa olevat pöly- ja mikrobipitoisuudet. (Myllys 1999)

### **2.4.1 Ilmanvaihdon ongelmat**

Ilmanvaihdon ongelmat voidaan jakaa kolmeen osaan: Rakenteelliset ja rakennuksesta johtuvat ongelmat, tuotannon laajuudesta johtuvat ongelmat, laitteista ja koneista johtuvat häiriöt (Anon 1991).

#### **Rakenteelliset ja rakennuksesta johtuvat ongelmat**

Navetoita lämmitetään harvoin lisälämmöllä. Tästä johtuen talvisin ilmanvaihtoa joudutaan pitämään liian alhaisella tasolla, jos minimi-ilmanvaihtoa ei ole suunniteltu oikein. Tällöin kaasuja ei saada aina poistettua tarpeeksi hyvin. Hyvällä eristyksellä lämmön karkaamista voidaan pienentää. Lannanpoiston yhteydessä muodostuu haitallisia kaasuja, jonka vuoksi olisi hyvä asentaa poistopuhallin puhaltamaan kaasut pois lantakuilusta. (Anon 1991)

### **Tuotannon laajuudesta johtuvat ongelmat**

Navetan ilmanvaihto mitoitetaan aina tietylle eläinmäärälle. Jos eläinmäärä kasvaa yli suunnitellun, ilmanvaihto jää alimitoitetuksi. Eläinmäärän vähentyessä, eläinten lämmöntuotto ei välttämättä riitä pitämään navettaa tarpeeksi lämpimänä. (Anon 1991)

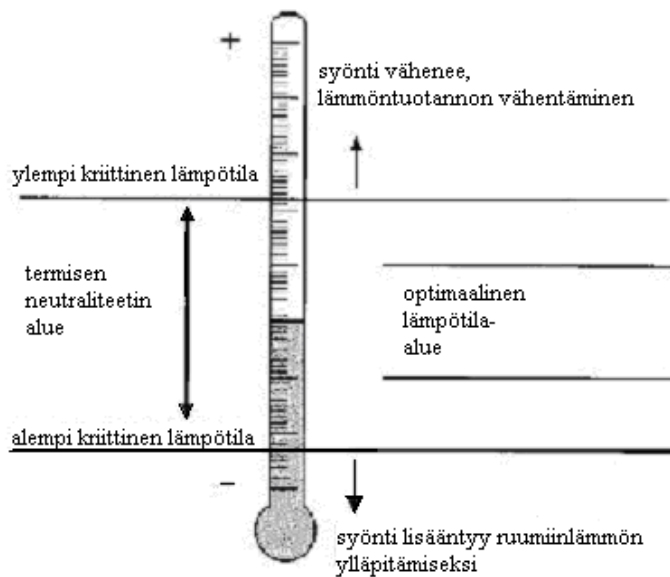
### **Laitteista ja koneista johtuvat ongelmat**

Yleisimmät ongelmat ovat alimitoitettut tuloilma-aukot ja poistopuhaltimet. Väärin säädetty ilmanvaihdon ohjausautomaatti voi aiheuttaa tilanteen, jossa ilmanvaihto ja lämmitys kilpailevat keskenään. Tällöin eläimillä on liian kuumat ja kuivat olosuhteet ja sähkönkulutus suuri. (Anon 1991)

Poistopuhaltimet ja tuloilmaluukut voivat rikkoontua myös iän myötä tai jopa kovan tuulen vaikutuksesta. Ilmanvaihto ei välttämättä toimi hyvin ääriolosuhteissa, jos vain osa puhaltimista tai luukuista on kunnossa.

#### **2.4.2 Huonon ilmanvaihdon vaikutus lehmään**

Eläimen optimilämpötila-aluetta kutsutaan termisen miellyttävyyden lämpötila-alueeksi (Kuva 13). Tällä alueella saadaan optimituotos ja eläin voi hyvin. Tämän alueen molemmin puolin sijoittuu termisen neutraliteetin alue, jonka ylärajana on ylempi kriittinen lämpötila ja alarajana alempi kriittinen lämpötila. Ympäristön lämpötilan pudotessa alemman kriittisen lämpötilan alle, eläin kuluttaa enemmän rehua ylläpitääkseen ruumiin lämpötasapainon ja tuotantonsa. Jos ympäristön lämpötila on taas korkeampi kuin ylempi kriittinen lämpötila, eläin lakkaa syömästä. Tällä eläin vähentää ruumiinsa lämpötilantuotantoa ja poistaa ylimääräistä lämpöä elimistöstään hikoilemalla ja tiheämmällä hengityksellä. (Myllys 1999)

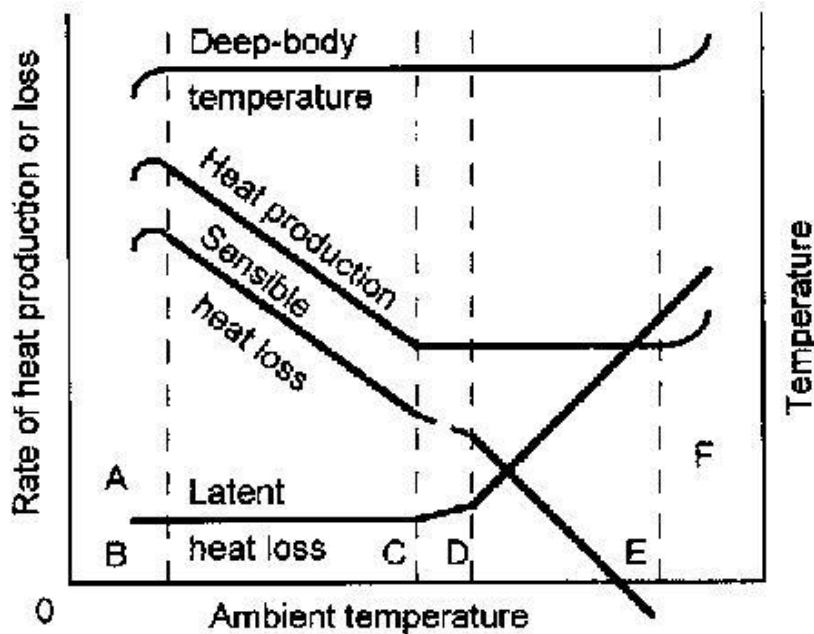


**Kuva 13. Eläimen lämpötila-alueet (Myllys 1999)**

Korkea-tuottoisella lypsylehmällä alempi kriittinen lämpötila voi olla jopa  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Bruce 1999). Tämä johtuu korkea-tuottoisen lypsylehmän korkeammasta lämmöntuotosta verrattuna heikompi tuottoisen lypsylehmän. Tuotanto ei laske toisin kuin ylemmän kriittisen lämpötilan kohdalla. Tällöin yleensä lehmälle tulee lämpöstressiä, joka voi laskea tuotosta jopa 25 % normaalista.

Kuvassa 14 on esitetty eläimen termisen miellyttävyyden alue. Siinä alue A on hypotermia eli vajaalämpöisyys, B alkavan hypotermian alue, C kriittinen lämpötila, D hikoilun eli latentin lämmön huomattava lisääntyminen, E alkava hypertermia ja F hypertermia eli liikalämpöisyys. Alueella CD aineen lämmönsäätö tarve on pienimmillään. Aineenvaihdunta on pienimmillään alueella CE ja lämmönsäätelyä tarvitaan alueella BE. (Mount 1973)

Taulukossa 3 on esiteltynä nautaeläimen alemmat kriittiset lämpötilat. Lehmille ja hiehoille sopiva lämpötila olisi  $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja ilmankosteus 60–80 % eristetyissä rakennuksissa (Anon 2002). Tämä lämpötila riittää myös vasikoille, jos sen ensimmäisinä päivinä käytetään lämpölamppua tuottamaan lisälämpöä (Kapuinen ja Karhunen 1988).



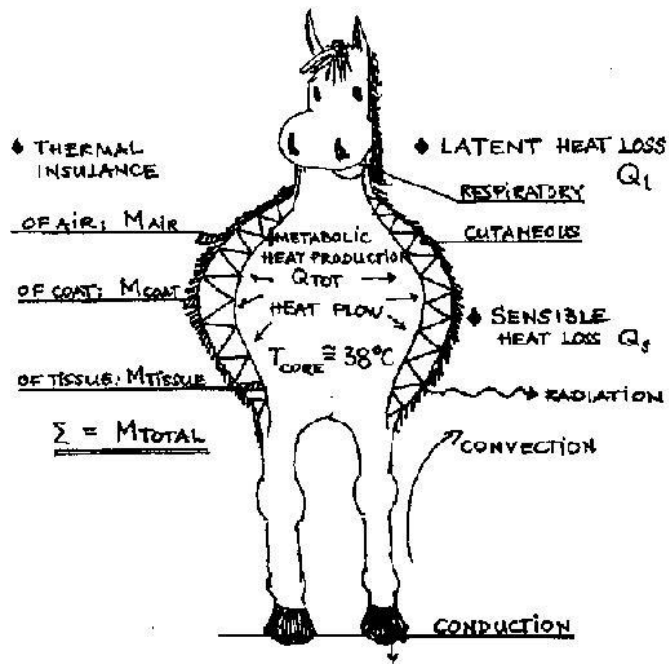
Kuva 14. Eläimen lämpöalueet ja lämmön luovuttaminen (Mount 1973)

Taulukko 3. Nautaeläimien kriittiset alemmat lämpötilat (Bruce 1999)

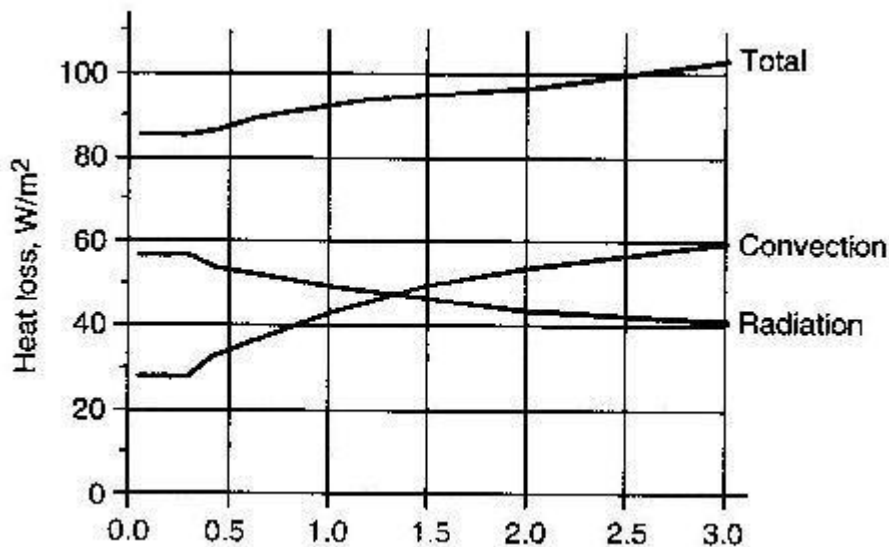
	Massa (kg)	Tuotos (kg/d)	Alempi kriittinen lämpötila (°C)
Lypsylehmä (ummessa)	500	0	-18
Lypsylehmä	500	15	-30
Lypsylehmä	500	35	-50
Hieho	500	0,5	-20
Vasikka	50	0,5	10

Lehmän ruumiinlämpö on 38,8 °C, johon päästääkseen se pyrkii säätelmään tuottamaansa ja luovuttamaansa lämpö määrää (Anon 2002). Lehmä luovuttaa aineenvaihdunnassa muodostuvan lämmön konvektiolla, säteilyllä, johtumalla ja haihduttamalla (Kuva 15) (Bruce 1999). Konvektio tarkoittaa lämmönsiirtymistä virtauksen mukana (Hautala 2004). Konvektio voi olla vapaata tai pakotettua. Pakotetussa konvektiossa systeemiin on lisätty ulkoista energiaa, kuten pumppu tai puhallin. Kuvassa 16 nähdään, että konvektio on tärkeämpi lämmön luovutuskeino kuin säteily ja se vain paranee ilmastovirtauksen kasvaessa. Lämmön johtumista tapahtuu lehmän maata, jolloin lämpöä johtuu lattiaan. Lehmä haihduttaa lämpöä hikoilemalla ja uloshengityksessä.





Kuva 15. Eläimen lämmön luovuttaminen (Morgan 1996)



Kuva 16. Ilmavirtauksen nopeuden vaikutus lämmön luovuttamiseen (Bruce 1999)

Huonosta ilmanvaihdosta seuraa liika kylmyys talvisin tai liika kuumuus kesäisin. Kylmyyden vuoksi rehun kulutus kasvaa ja kuumuuden seurauksena tuotos laskee (Myllys 1999). Myös alhainen tai liian korkea ilmankosteus aiheutuu vääränlaisesta ilmanvaihdosta (Anon 1991). Rikkivedylle altistunut lehmä lypsää huonosti, laihtuu, aristelee jalkojaan ja sen karvapeite on nuhrainen (Karhunen 1992).

### 2.4.3 Huonon ilmanvaihdon vaikutus hoitajiin ja navetan rakenteisiin

Liika hiilidioksidin määrä aiheuttaa päänsärkyä, väsymistä sekä työtehon heikkenemistä (Haahtela, Nordman ja Talikka 1988). Hiilidioksidia muodostuu eläinten ja bakteerien hengityksestä. Se on ilmaa raskaampaa, mautonta ja hajutonta (Anon 1987). Liiallisen hiilidioksidimäärän aistii tilan tunkkaisuutena. Taulukossa 4 on esiteltynä vaarallisten kaasujen suurimmat hyväksyttävät pitoisuudet. Häkä on harvinaista navettarakennuksissa, mutta sitä voi ilmetä navettarakennuksen lisälämmityksen yhteydessä, jos palamiskaasuja pääsee sisätiloihin. Ammoniakilla on pistävä haju ja sitä muodostuu virtsan, tuoreen lannan ja orgaanisen aineen hajotessa. Se on ilmaa kevyempää ja veteen liukenevaa (Anon 1987). Jatkuva korkea ammoniakkipitoisuus aiheuttaa limakalvovaurioita (Myllys 1999).

Rikkivedylle on ominaista mädäntyneen kananmunan haju. Sitä muodostuu lietesäiliöissä ja -kanavissa, etenkin kuin niitä tyhjennetään tai sekoitetaan ja ilmavirtaus on navettaan päin (Myllys 1999). Rikkivety ärsyttää hermostoa ja silmiä. Se on ilmaa raskaampaa ja veteen liukenevaa (Anon 1987). Orgaaninen pöly aiheuttaa erilaisia allergioita ja hengityssairauksia. Orgaaninen pöly käsittää pölyä, mikrobeja, homesienten itiöitä ja eläinten karvoja. Metaania muodostuu orgaanisten aineiden hajotessa. Se on hajutonta, ilmaa kevyempää ja helposti räjähtävää. Suurin sallittu metaanipitoisuus on 1000 ppm. Metaanilla ei ole merkitystä tautien aiheuttajana (Anon 1987).

**Taulukko 4. Vaarallisten kaasujen suurimmat hyväksyttävät pitoisuudet eläinten kannalta (Anon 1998)**

Hiilidioksidi, CO <sub>2</sub>	3000 ppm
Ammoniakki, NH <sub>3</sub>	10 ppm
Rikkivety, H <sub>2</sub> S	0,5 ppm
Häkä, CO	5 ppm
Orgaaninen pöly	10 mg/m <sup>3</sup>

Pienimmätkin pitoisuudet voivat aiheuttaa haitallisia vaikutuksia, jos on kyseessä useiden eri kaasujen seos (Anon 1987).

### 2.4.4 Minimi ilmanvaihdon tarve

Minimi ilmanvaihdon tarve tulee kyseeseen talvisin. Tällöin ilmanpoiston kriteerinä ovat haitalliset kaasut. Lämpöä ei saa poistua liikaa, jotta eläimillä ja hoitajilla olisi siedättävät

oltavat, muutoin täytyy käyttää lisälämpöä. Kaavassa 2 on esitetty minimi ilmanvaihto tarpeen mitoitus vesihöyryn avulla ja kaavassa 3 hiilidioksidin avulla (Karhunen ja Tuunanen 1984). Yleensä minimi-ilmanvaihdon tarve mitoitetaan vesihöyryn poistamisen mukaan, koska tämän mitoituksen mukaan poistuvat myös haitalliset kaasut (Myllys 1999).

$$V_1 = \frac{g_s}{\rho_s(x_s - x_u)} \quad (2)$$

jossa,

$V_1$  = tarvittava ilmavirta, m<sup>3</sup>/h

$g_s$  = rakennuksessa tapahtuva vesihöyryn muodostus, g/h

$\rho_s$  = ilman tiheys sisäilman lämpötilassa, kg kuivaa ilmaa/m<sup>3</sup>

$x_s$  = sisäilman vesisisältö, g/kg

$x_u$  = ulkoilman vesisisältö, g/kg

$$V_2 = \frac{K}{c - c_u} \quad (3)$$

jossa,

$V_2$  = tarvittava ilmavirta, m<sup>3</sup>/h

$K$  = hiilidioksidin kehittymisnopeus, l/h

$c$  = suurin sallittu hiilidioksidi pitoisuus eläinsuojan ilmassa, l/m<sup>3</sup>

$c_u$  = ulkoilman hiilidioksidi pitoisuus, l/m<sup>3</sup> (normaalisti 0,3 l/m<sup>3</sup>)

Hiilidioksidin kehittymisnopeus voidaan laskea suoraan eläimen lämmön tuotosta (Albright 1990). Jokaista 24,6 kJ:a tuotettua lämpöä kohti eläin tuottaa yhden litran hiilidioksidia, toisin sanoen yksi litra jokaista 6,7 Wh:a kohti. Eli jos eläin tuottaa lämpöä 800 W eli tunnissa 800 Wh, niin hiilidioksidia muodostuu tunnissa noin 120 litraa.

Hiilidioksidin voi laskea myös kaavan 4 mukaan (Müller 2001). Lämmön kokonaistuotto (Kaava 6) saadaan johdettua suoran lämmön tuoton kaavasta (Kaava 5).

$$V_{CO_2} = 0,163 \cdot P_{kok} \quad (4)$$

jossa,

$V_{CO_2}$  = hiilidioksidin tuotto (l/h)

$P_{kok}$  = lämmön kokonaistuotto

$$\Phi_{sen} = \Phi_{kok} (0,8 - \alpha(T_x - K_t)^4) \quad (5)$$

$$\Phi_{kok} = \frac{\Phi_{sen}}{(0,8 - \alpha(T_x - K_t)^4)} \quad (6)$$

joissa

$\Phi_{sen}$  = suoralämmöntuotto

$\Phi_{kok}$  = lämmön kokonaistuotto

$$\alpha = \frac{0,8}{(40 - K_t)^4}, \text{ jos } K_t \text{ on tuntematon, niin voidaan käyttää } \alpha = 1,28 \cdot 10^{-7}$$

$K_t$  = kerroin, sama kuin alempi kriittinen lämpötila, jos tuntematon niin  $K_t = -10$ .

$T_x$  = lämpötila

Lehmä poistaa liikalämpöä vuorokaudessa 15–20 kg vetenä hikoilemalla tai hengitysteiden kautta (Anon 2002). Jos kosteuden tuotto ja kosteuden poistaminen eivät ole tasapainossa, sitä alkaa kertyä rakennelmiin. Puupinnat alkavat lahota ja metallipinnat ruostumaan pitkäaikaisen liiallisen kosteuden seurauksena.

Vesisisältö saadaan selville mollier-diagrammista (Liite 1), kun tiedetään lämpötila sekä ilman suhteellinen kosteus. Lämpötila luetaan pystyakselilta, jonka kohdalta liikutaan vaakasuunnassa vallitsevaan ilman kosteuteen saakka. Tältä kohdalta saadaan vesisisältö, kun siirrytään suoraan ylhäällä sijaitsevaan vesisisältö asteikkoon. Esimerkiksi, jos sisälämpötila on 12 °C ja ilman suhteellisenä kosteutena 80 %, saadaan sisäilman vesisisällöksi 7 g jokaista ilma kg kohden (Liite 1).

#### 2.4.5 Maksimi ilmanvaihdon tarve

Maksimi ilmanvaihdon tarpeen mukaan mitoitetaan kesäkauden ilmanvaihto. Tällöin mitoituksen kriteerinä on ylimääräisen lämmön poisto. Ilmanvaihdon mitoitus lämmön mukaan lasketaan kaavan 7 avulla (Karhunen ja Tuunanen 1984).

$$V_3 = \frac{3,6 \cdot \varphi_{iv}}{\rho_s c_p (t_s - t_u)} \quad (7)$$

jossa,

$V_3$  = tarvittava ilmavirta, m<sup>3</sup>/h

$\varphi_{iv}$  = ilmanvaihdon mukana poistuva vapaa lämpö, W

$\rho_s$  = ilman tiheys sisäilman lämpötilassa, kg kuivaa ilmaa/m<sup>3</sup>

$c_p$  = ilman ominaislämpö,  $c_p = 1,006$  kJ/kg °C

$t_s$  = sisälämpötila, °C

$t_u$  = ulkolämpötila, °C

## 2.5 Aikaisemmat tutkimukset

Agroteknologian laitoksella on tehty joitakin tutkimuksia navetan ilmanvaihtoon liittyen. Hannu Gröhn on tutkinut Pro gradussaan navetan olosuhteita. Tuulen vaikutuksesta tuloilmaluukkuihin on tutkittu Juha Sariolan Pro gradussa. Kalle Mattilan Pro gradussa on tutkittu verhoseinäpihattojen toimivuutta Suomessa. Tutkimuksessa selvisi, että ulkolämpötila vaikuttaa vahvasti navetan sisäilmastoon. Verhoseinäpihaton ilmanvaihto toimii, kun pihatolle suunniteltu eläinmäärä on käytössä.

Frederick Teye on tutkinut väitöskirjassaan navetoiden kaasupäästöjä ja ilmanlaatua. Agroteknologian laitoksella ei ole tehty aikaisempia tutkimuksia ilmanvaihdon säätämisestä lämpötila-eron mukaan.

MTT on tutkinut kylmäpihattojen toimivuutta Suomessa ja Virossa. Myös verhoseinäpihaton ilmanvaihdon toimivuutta on tutkittu MTT:n toimesta.

Muualla maailmalla on tutkittu lämpöstressiä, luonnollista ilmanvaihtoa, navetan jäähdytystä kesäisin, mutta ei ilmanvaihdon säätämistä lämpötila-eron mukaan.

### 3 TYÖN TAVOITTEET

Tämän työn päätavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa tuloilmaluukkujen säätö Viikin opetus- ja tutkimustilan navettaan. Tarkoituksena oli säätää ilmanvaihtoa ulko- ja sisälämpötilaerojen mukaan. Tavoitteena oli huomioida myös tuulen muutokset. Tavoitteena oli, että kovalla tuulella luukut suljetaan automaattisesti. Näin estettiin vastakkaisen puolen luukkujen hakkautuminen kiinni ja auki. Aluksi selvitettiin navetan nykyinen ilmanlaatu ja lopuksi verrattiin sitä automaattisen säädön aikaiseen ilmanlaatuun.

Työn tavoitteet olivat:

1. Suunnitella ja toteuttaa automaattisesti toimiva tuloilmaluukkujen säätö
2. Pitää lämpötila minimissään 12 °C:ssa ja maksimissaan 14 °C:ssa minimi ilmanvaihdon aikana
3. Ottaa huomioon navetan ulkolämpötilan muutokset luukkuja säädettäessä
4. Huomioida tuulen vaikutus tuloilmaluukkuja säädettäessä

## 4 AINEISTO JA MENETELMÄT

### 4.1 Koeolosuhteet

Tutkimus tehtiin Viikin koetilan navetassa. Navetassa on alipaineilmanvaihtojärjestelmä. Tuloilmaluukkuja (Kuvat 17 ja 18) on yhteensä 45 metriä. Tuloilmaluukut ovat kiinni remmeillä tangossa (Kuva 18), jota pyörittää sähkömoottori. Luukut menevät kiinni, kun remmiä pyöritetään tangon ympärille. Luukut aukeavat, kun remmejä löysätään. Poistopuhaltimet (Kuva 19) sijaitsevat katon harjalla ja niitä on yhteensä 5 kappaletta. Lannanpoistojärjestelmä on kuivalantajärjestelmä.

Navetan mitat ovat liitteessä 2 ja pohjapiirustus liitteessä 3. Tilassa, jossa ilmanvaihtoa säädettiin, on vain lypsylehmiä. Tila koostuu pihatto- ja parsipuolesta. Parsipuoli on kuvassa (Liite 3) alempana ja pihattopuoli pidemmällä seinustalla. Parsipuolella sijaitsevat fistelilehmät. Vasikat ovat erillisessä tilassa, jonka ilmanvaihtoa ei tässä tutkimuksessa säädetty. Ennen tutkimusta tuloilmaluukkujen säätäminen oli manuaalista sekä automaattista. Alkuperäinen automaattinen säätö perustuu puhaltimien kierrosnopeuksiin. Puhaltimien pyörimisnopeus määräytyy taas navetan sisälämmön mukaan.



Kuva 17. Viikin navetassa käytettävät tuloilmaluukut navetan sisäpuolelta kuvattuna



**Kuva 18. Viikin navetassa käytettävät tuloilmaluukut navetan ulkopuolelta kuvattuna**



**Kuva 19. Viikin navetan poistopuhallin navetan sisäpuolelta kuvattuna**

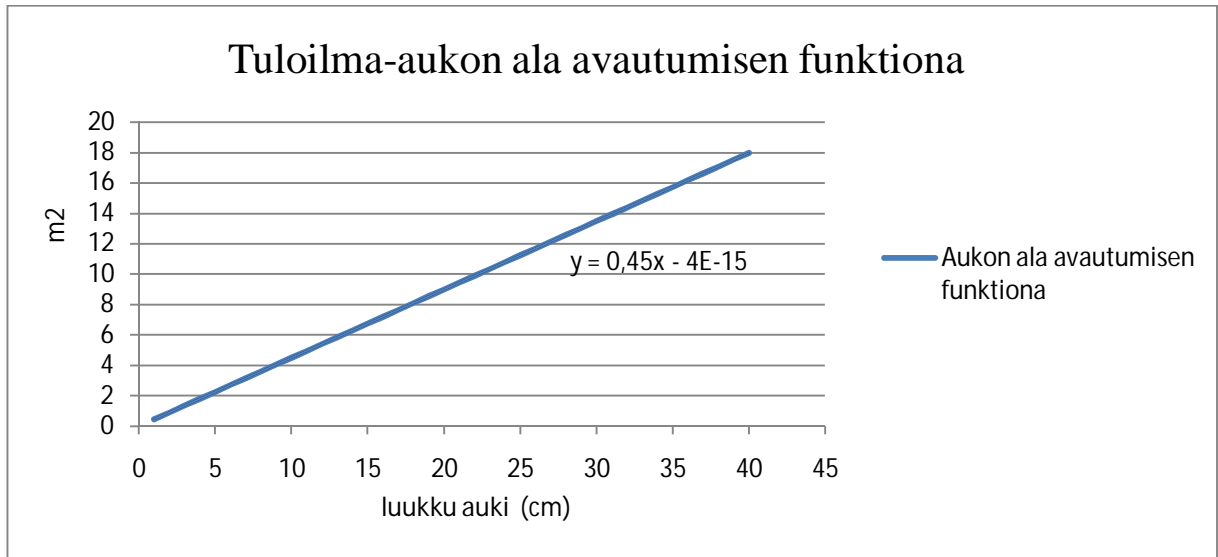
Havaittuja ongelmia kyseisen navetan ilmanvaihdossa oli vähäinen säätäminen. Käytännössä luukut olivat jatkuvasti kiinni. Tästä johtuen sisälämpötila oli optimilämpötilaa huomattavasti suurempi ja haitallisten kaasujen pitoisuudet korkeat. Myös tuulen vaikutus tuloilmaluukkuihin oli ongelmana. Tuulen oltaessa riittävän voimakasta, tuulen vastaiset luukut hakkautuivat kiinni. Koska kyseessä on tutkimusnavetta, toivottu sisälämpötila on 12–14 °C.

## **4.2 Koejärjestelyt**

### **4.2.1 Ilmanvaihdon mitoitus**

Ensin selvitettiin kuinka paljon tuloilmaluukkujen ala kasvaa niiden avonaisuuden muuttuessa (Kuva 20). Luukkujen kokonaisuuspituus on noin 45 metriä.

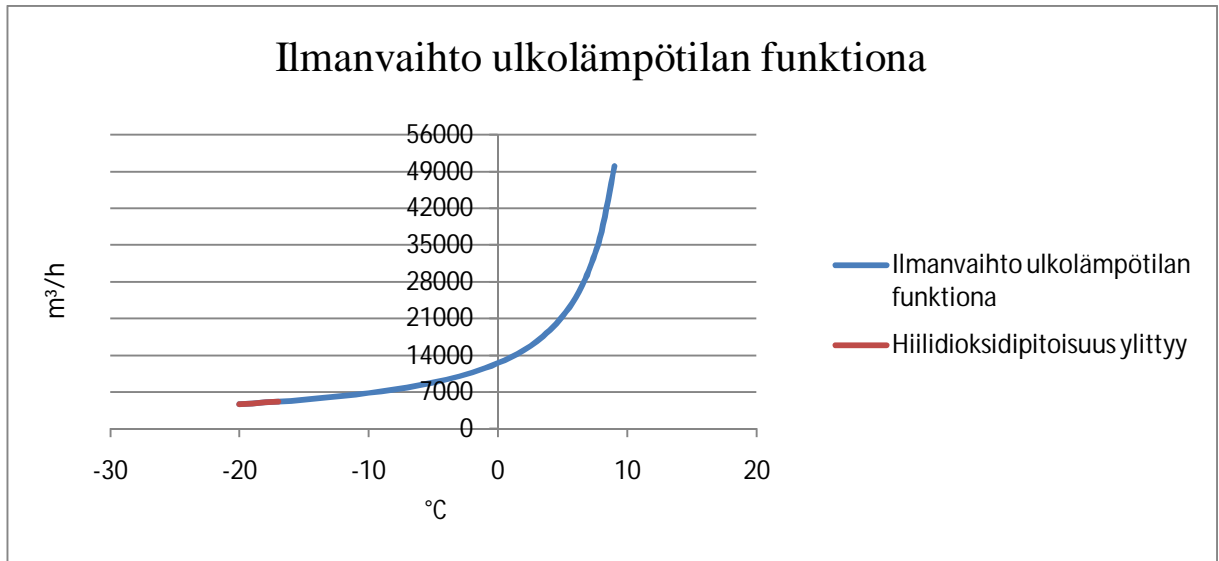




**Kuva 20. Tuloilmaluukkujen ala niiden avonaisuuden funktiona**

Ilmanvaihdon tarve laskettiin ylimääräisen lämmöntuoton kaavalla (Kaava 7). Eläinmääränä käytettiin 70 lypsylehmää ja yhden eläimen luovuttamana lämpöenergiana taulukosta 2 katsottuna kahden ensimmäisen painoluokan keskiarvoa 750 W. Kuvassa 21 on esiteltynä ilmanvaihdon tarve ulkolämpötilan funktiona. Sisälämpötilana käytettiin 12 °C. Rakennuksen lämpöhäviöitä ja ilman mukana poistuvaa lämpöä ei otettu huomioon. Tosin myöskään navetan lisälämpöä ei ole otettu huomioon.

Suurin sallittu hiilidioksidipitoisuus eläinrakennuksessa on 3000 ppm (Anon 1998). Koska yksi lehmä tuottaa noin 200 l/h hiilidioksidia, niin Viikin koetilan koko karja tuottaa noin 14000 l/h. Kaavalla 3 laskettuna ilmanvaihdon tulisi minimissään olla 5185 m<sup>3</sup>/h. Kuvassa 21 kuvaajaan on merkattu punaisella, jolloin ilmanvaihto ei ole riittävän suuri poistaakseen hiilidioksidia raja-arvoon saakka.

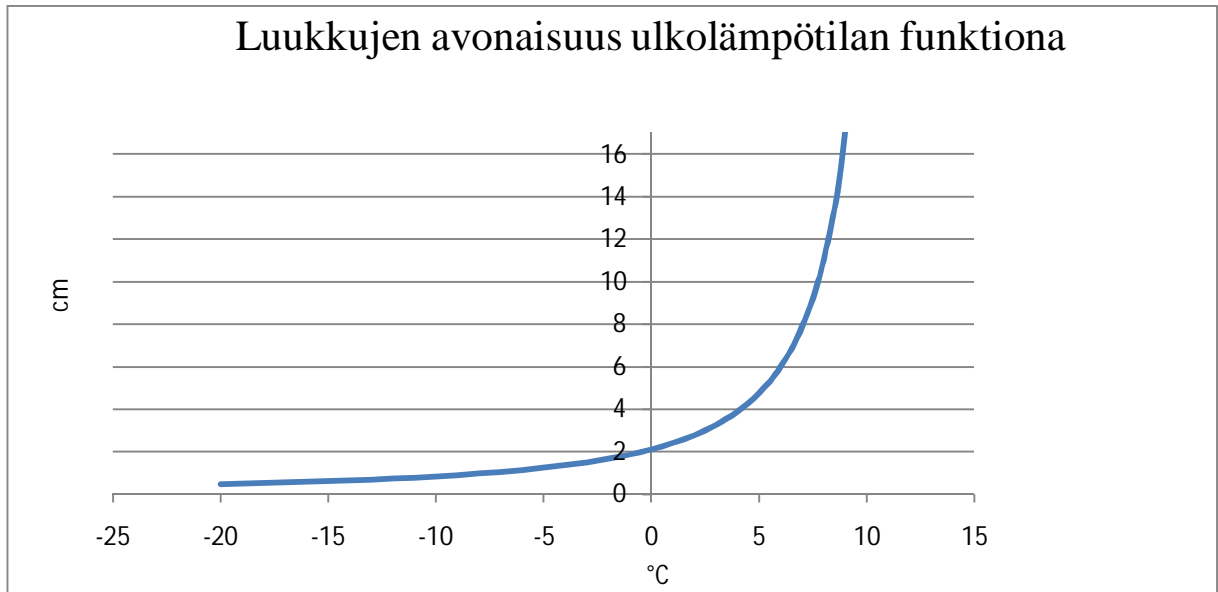


**Kuva 21.** Laskennallinen ilmanvaihdon tarve eri ulkolämpötiloilla, kun sisälämpötilana 12 °C

Luukkujen avonaisuus saadaan laskettua luonnollisen ilmanvaihdon kaavasta (Kaava 1). Kun siitä ratkaistaan pinta-ala  $A$ , niin saadaan kaava 8.

$$A = 2 \frac{V}{\sqrt{g \Delta h \frac{T_s - T_u}{T_s}}} \quad (8)$$

Kun pinta-ala jaetaan luukkujen pituudella, saadaan kuvan 22 mukaiset luukkujen avonaisuudet ulkolämpötilan muuttuessa.



Kuva 22. Ulkolämpötilan vaikutus luukkujen avonaisuuteen, kun sisälämpötilana 12 °C

#### 4.2.2 Säätölogiikka

Tutkimuksessa käytettävä logiikka tehtiin Crouzet'in omalla Millenium 3 ohjelmistolla. Sillä voidaan ohjelmoida joko tikapuumallilla (Ladder Diagram) tai FBD:llä (Function Block Diagram). Tässä tutkimuksessa käytettiin ohjelmointikielenä FBD:tä logiikkaa tehdessä.

Logiikkaohjaimena käytettiin Crouzet CD20:ntä (Kuva 23). Ohjain sisältää itsessään 12 digitaalista tuloa, joista kuutta voidaan käyttää analogisena. Lähtöjä Crouzet CD20:ssä on yhteensä 8. Laitteen resoluutio on 10 bittiä ja se ymmärtää analogia signaalin välillä 0-10 V. Moottorin ohjaaminen tapahtui digitaalilähtöjen kautta. Tuuli- ja lämpötila-anturit tulivat analogiatuloihin.



Kuva 23. Tutkimuksessa käytettävä logiikkaohjain Crouzet CD20

### **Alkuperäinen säätölogiikka**

Tuloilmaluukkujen alkuperäinen säätölogiikka perustui poistopuhaltimien kierrosnopeuteen. Poistopuhaltimien kierrosnopeus säätyi taas navetan sisälämpötilan mukaan. Tuulelle voitiin valita tietty raja, jolloin tuulen puoleiset luukut menivät kiinni.

### **Uusi säätölogiikka**

Uudessa säätölogiikassa tuloilmaluukkujen ohjaus toteutettiin sisä- ja ulkolämpötilaerojen mukaan. Lämpötila-anturien antamat jänniteviestit skaalattiin kaavan 9 avulla.

$$y = \frac{A}{B} \cdot x - C \quad (9)$$

jossa,

$y$  = lämpötila (C°)

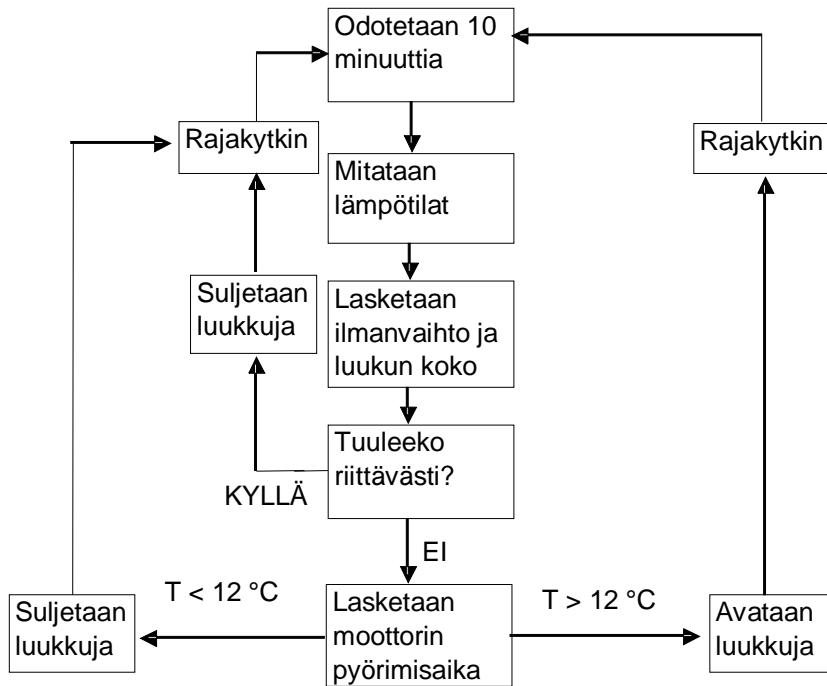
$A$  = 3266 (toisessa lämpötila-anturissa 3279)

$B$  = 10000

$C$  = 273

$x$  = lämpötila-anturin antama lukuarvo

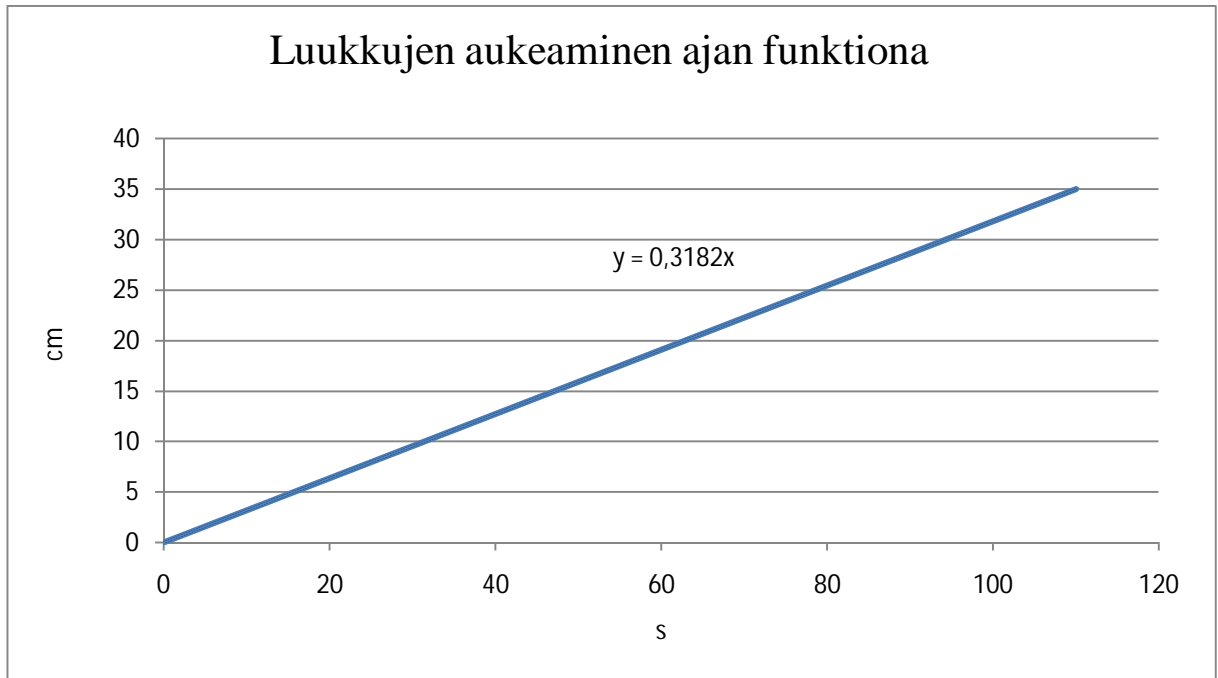
Kuvassa 24 on esiteltynä tutkimuksessa käytetyn logiikan toiminta lohkokaaavana. Kaavojen 7 ja 8 avulla ratkaistiin tarvittava luukkujen avonaisuus kunakin hetkenä.



**Kuva 24. Logiikan kierto**

Eläinmääränä käytettiin 70 lypsylehmää ja yhden eläimen luovuttamana lämpöenergiana taulukosta 2 katsottuna kahden ensimmäisen painoluokan keskiarvoa 750 W. Kaavalla 8 saatiin selville kuinka paljon tuloilmaluukkujen kokonaispinta-ala tulisi olla. Kun tämä arvo jaettiin luukkujen pituudella, saatiin selville kuinka paljon luukkujen pitäisi olla auki.

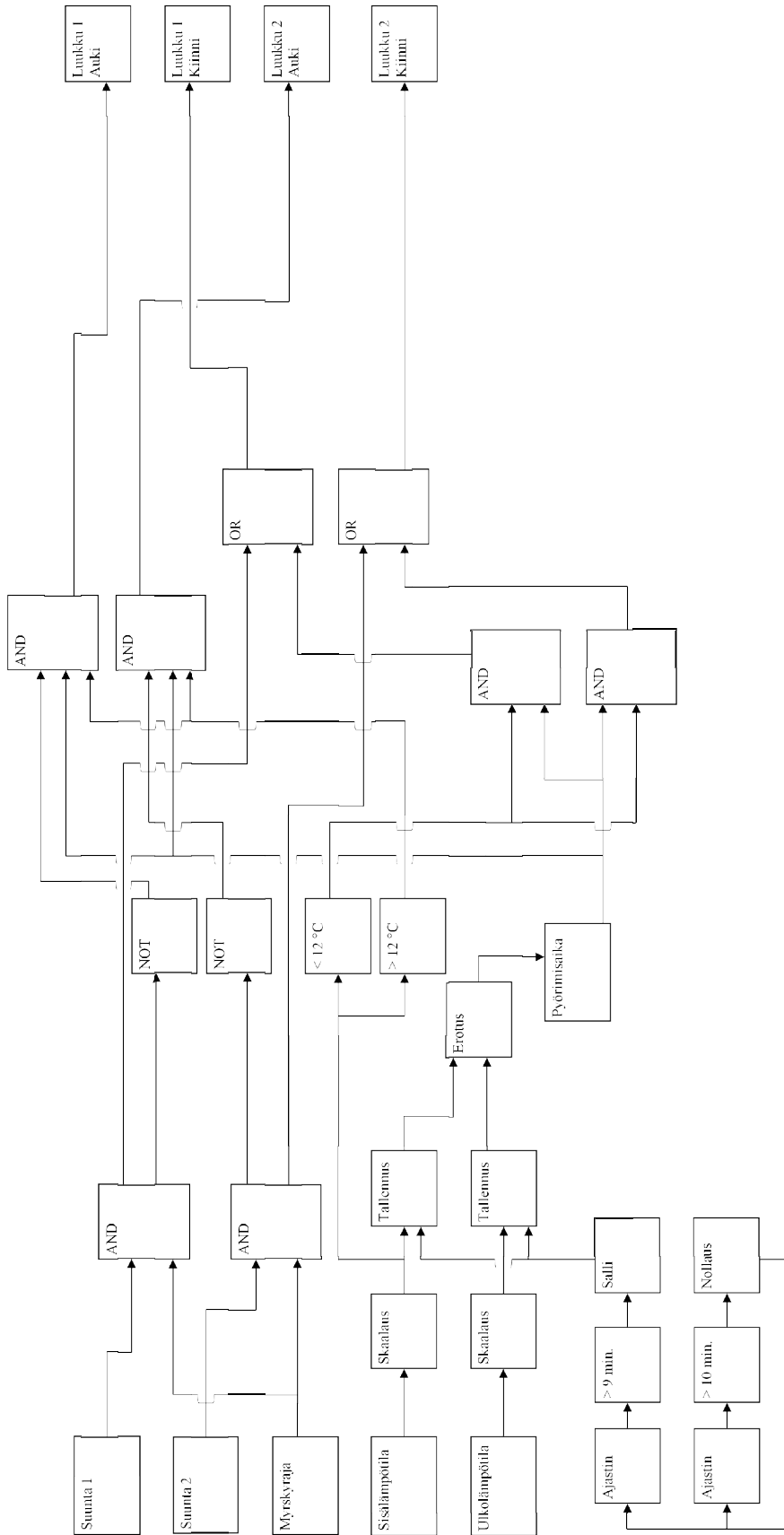
Luukkujen säätömoottorille laskettiin aika mikä kuluu siihen, että luukut olivat täysin auki. Kuvassa 25 on esiteltynä kuvaaja luukkujen aukeamisesta ajan funktiona. Kyseisen suoran kulmakertoimella jaettiin laskettu tuloilmaluukun avonaisuus ja saatiin aika minkä moottorin tulisi pyöriä. Rajakytkimillä estettiin moottorien pyöräily, jos luukut olivat jo ääriasennossa.



**Kuva 25. Luukkujen aukeamiseen kuluva aika**

Kuvassa 26 on esiteltynä uusi tuloilmaluukkujen säätölogiikka. Sisä- ja ulkolämpötilat mitataan ja skaalataan alussa. Lämpötilat tallennetaan 9 minuutin välein, jonka jälkeen lasketaan lämpötilaero. Logiikkaan on laskettu valmiiksi eri lämpötilaeroille vastaavat luukkujen säätöajat. Sopiva säätöaika valitaan sen mukaan mikä on nykyinen lämpötilaero. Säädölle jää aikaa yksi minuutti. Tämän jälkeen ajastimet nollataan. Jos sisälämpötila on alle 12 °C, luukkuja suljetaan. Jos sisälämpötila on yli 12 °C, luukkuja avataan.

Tuulen voimakkuus ja suunta on otettu myös mukaan logiikkaan (Kuva 26). Jos molemmat ehdot täyttyvät, tuulenpuoleiset luukut ajetaan kiinni. Tuulen puoleisia luukkuja ei avata ennen kuin tuuli tyyntyy alle annetun raja-arvon.



### Kuva 26. Uuden säädön logiikka

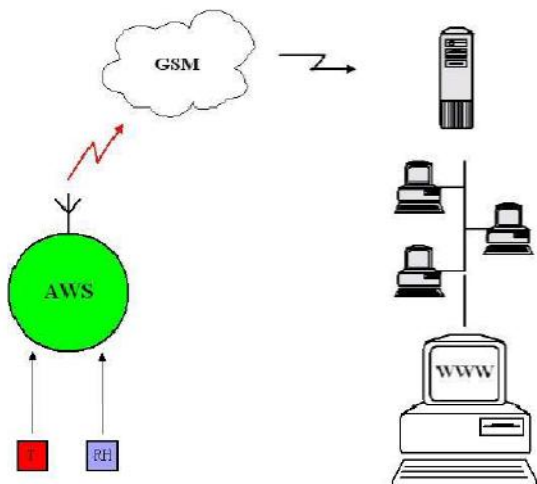
### 4.3 Laitteet

Tutkimuksessa käytettävät laitteet voidaan jakaa olosuhteiden mittaamiseen ja itse tuloilmaluukkujen säätämiseen tarvittaviin laitteisiin. Tuloilmaluukkujen säätämiseen tarvittavia laitteita ovat logiikkaohjain, lämpötila- ja tuulianturit.

#### 4.3.1 Olosuhteiden mittaus

Navetan sisäolosuhteita mitattiin jatkuvasti navetan keskiosaan sijoitetuilla antureilla. Mitattavia suureita olivat lämpötila, kosteus ja hiilidioksidi. Lämpötilaa ja hiilidioksidia mitattiin kahdesta eri kohdasta.

Mittaukset suoritettiin kerran puolessa tunnissa. Mittauslaitteisto oli kytketty A-lab OY:n valmistamaan AWS-SC tiedonsiirtojärjestelmään (Kuva 27). Laitteisto lähetti mitatut arvot tekstiviestin muodossa tietokantapalvelimelle. Mitatut suureet saatiin A-login internet-sivuilta halutessaan valmiina kuvaajina tai Excel-tiedostoina.



Kuva 27. Kaavio AWS-SC tiedonsiirtojärjestelmän toimintaperiaatteesta

Lisäksi tehtiin alustavia olosuhtemittauksia Ahlborn:in valmistamalla Almeno 2690 käsimittarilla (Kuva 28). Sillä saatavia suureita olivat lämpötila ja hiilidioksidi.





**Kuva 28. Olosuhdemittari Ahlborn Almeno 2690**

#### **4.3.2 Lämpötila-anturi**

Olosuhteita mitattaessa lämpötila-antureina käytettiin Pt1000:sia (Kuva 29). Pt1000 perustuu resistanssin muutokseen lämpötilan muuttuessa. Resistanssi muuttuu niin, että 0 °C:ssa se on 1000  $\Omega$ . Taulukossa 5 on esiteltynä lämpötilat eri resistansseissa. Taulukkoa luetaan niin, että alaspäin mentäessä lämpötilat ovat 10 °C välein ja oikealle mentäessä 1 °C välein. Esimerkiksi 20 °C on 1077,9  $\Omega$  ja 22 °C on 1085,7  $\Omega$ .



**Kuva 29. Pt1000 lämpötila-anturi**

Taulukko 5. Pt1000:n vastusalueet eri lämpötiloissa

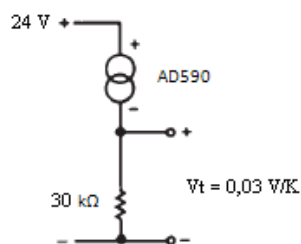
°C	0,0	-1,0	-2,0	-3,0	-4,0	-5,0	-6,0	-7,0	-8,0	-9,0
-50,0	803,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-40,0	842,9	838,8	834,8	830,8	826,9	822,9	818,9	815,0	811,0	807,0
-30,0	822,2	878,3	874,3	870,4	866,4	862,5	858,5	854,6	850,6	846,7
-20,0	921,6	917,7	913,7	909,8	905,9	901,9	898,0	894,0	890,1	886,2
-10,0	960,9	956,9	953,0	949,1	945,2	941,2	937,3	933,4	929,5	925,5
0,0	1000,0	996,1	992,2	988,3	984,4	980,4	976,5	972,6	968,7	964,8
°C	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
0,0	1000,0	1003,9	1007,8	1011,7	1015,6	1019,5	1023,4	1027,3	1031,2	1035,1
10,0	1039,0	1042,9	1046,8	1050,7	1054,6	1058,5	1062,4	1066,3	1070,2	1074,0
20,0	1077,9	1081,8	1085,7	1089,6	1093,5	1097,3	1101,2	1105,1	1109,2	1112,8
30,0	1116,7	1120,6	1124,5	1128,3	1132,2	1136,1	1139,9	1143,8	1147,7	1151,5
40,0	1155,4	1159,3	1163,1	1167,0	1170,8	1174,7	1178,5	1182,4	1186,2	1190,1
50,0	1194,0	1197,8	1201,6	1205,5	1209,3	1213,2	1217,0	1220,9	1224,7	1228,6

Logiikkaohjauksessa käytetyt ulko- ja sisälämpötilat mitattiin AD590KH puolijohdelämpötila-antureilla (Kuva 30). Anturi antaa ulos virtaviestiä, jossa yksi mikroampeeri vastaa yhtä kelviniä. Anturi kalibroitiin niin, että 25 C°:ssa virtaviesti on 298,2  $\mu$ A:a. Kuvassa 31 on esiteltynä AD590 puolijohdeanturin kytkentäkaavio. Kun AD590 kytketään sarjaan 10 k $\Omega$  vastuksen kanssa, niin 0,01 voltin jännite vastaa yhtä kelviniä. Eli 0 C° lämpötilassa jännite olisi 2,73 V.

Crouzet CD20 havaitsee 30 mV muutoksen ja AD590:n antaa vain 10 mV tarkkuudella. Jänniteviesti tulee siis kolminkertaistaa. Kytkemällä kolme 10 k $\Omega$ :n vastusta sarjaan saadaan yhden asteen muutos vastaamaan 30 mV. Eli 0 C° lämpötilassa jännite olisi 8,16 V.



Kuva 30. Puolijohdeanturi AD590KH

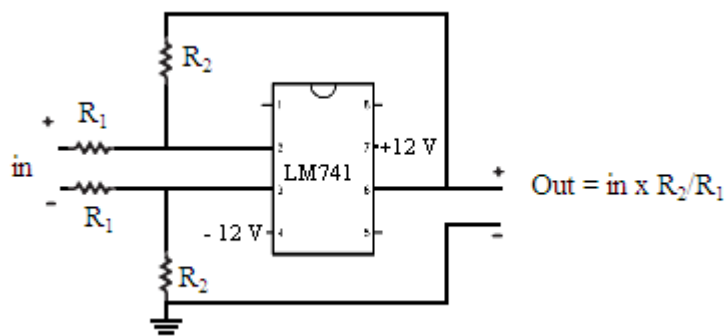


Kuva 31. AD590 puolijohdeanturin kytkentäkaavio

Crouzet CD20:ssä on sisääntuloresistanssi  $12\text{ k}\Omega$  eikä se täten saa luettua edellä mainitun lämpötila-anturin ulostulojännitettä, koska anturin resistanssi on suurempi. Logiikan sisäänmenon ja anturien väliin laitetaan operaatiovahvistin LM741 (Kuva 32), jonka kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 33. Vahvistin ei kuitenkaan vahvista jänniteviestiä eli  $R_1$  ja  $R_2$  ovat yhtä suuret.



Kuva 32. Operaatiovahvistin LM741



Kuva 33. Operaatiovahvistimen LM741 kytkentäkaavio

#### 4.3.3 Hiilidioksidianturi

Hiilidioksidianturina käytettiin Senseair:in valmistamaa K30 (Kuva 34). Anturin mittausalue  $0\text{--}5000\text{ ppm}$ . Sen tarkkuus on  $\pm 30\text{ ppm}$ .



Kuva 34. Tutkimuksessa käytetty hiilidioksidianturi K30

#### 4.3.4 Kosteusanturi

Kosteusanturina käytettiin Honeywell'in valmistamaa HIH 4000 (Kuva 35). Sen mittausalueena on 0-100 % ja sen tarkkuus on  $\pm 3,5$  %.

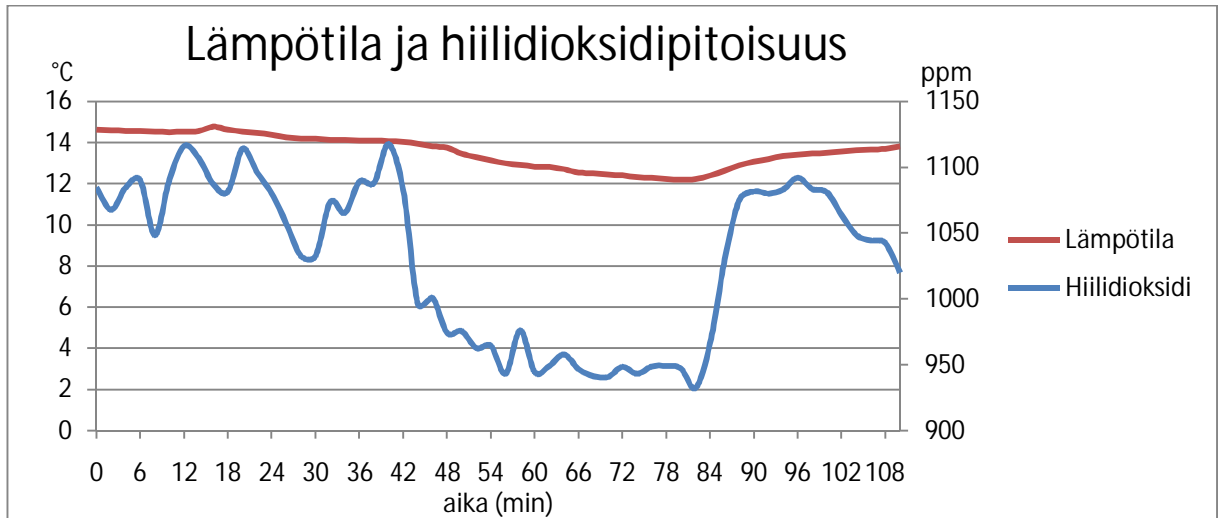


Kuva 35. Tutkimuksessa käytetty kosteusanturi HIH 4000

## 5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

### 5.1 Alustavat mittaukset

Kuvassa 36 on esiteltynä lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus ajan funktiona. Luukut ovat täysin kiinni aina 15 minuuttiin saakka, jonka jälkeen niitä avattiin 2,5 cm. Luukut ovat 40 minuutin kohdalla 3,5 cm auki. Luukut ovat taas täysin kiinni 80 minuutin kohdalla ja siitä eteenpäin.



Kuva 36. Lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus ajan funktiona

### 5.2 Olosuhdemittausten tulokset

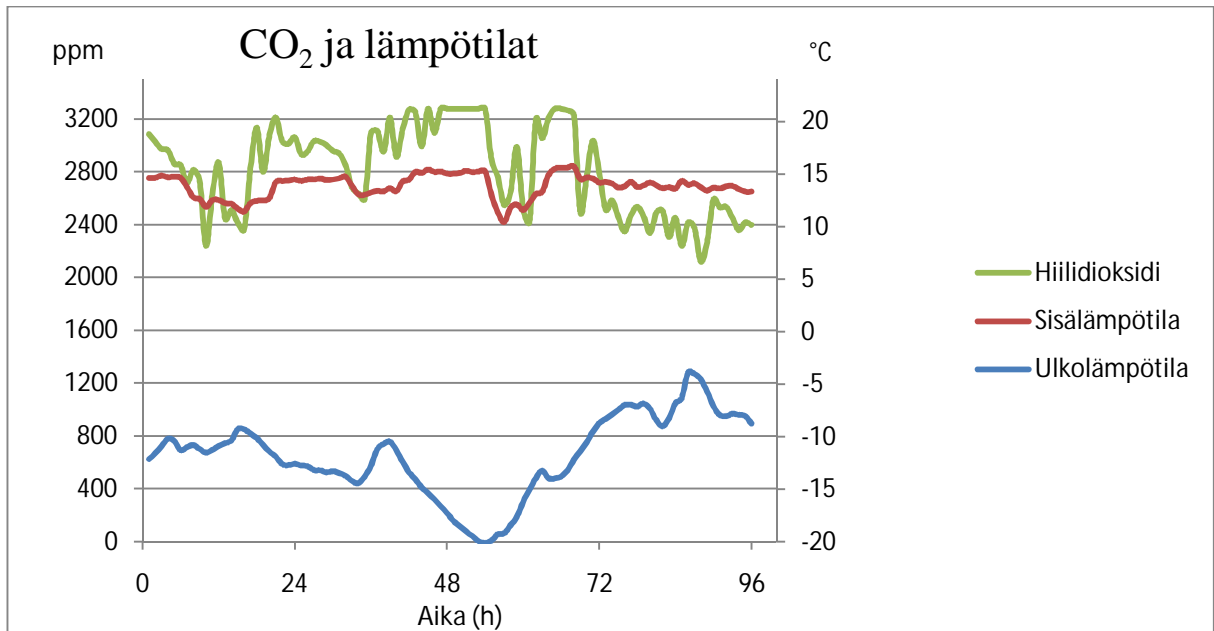
Navetan olosuhteita mitattiin ennen säätöä ja alkuperäisen sekä uuden säädön aikana.

#### 5.2.1 Tulokset ilman automaattista säätöä

Kun tuloilmaluukkujen automaattisäätö on pois päältä, niin luukut ovat täysin kiinni. Kuvassa 37 on esiteltynä hiilidioksidipitoisuus, sisä- ja ulkolämpötilat neljän peräkkäisen vuorokauden aikana. Ulkolämpötila vaihtelee  $-4 - (-20) ^\circ\text{C}$ . Sisälämpötila on keskimäärin  $14 ^\circ\text{C}$  mutta putoaa lähemmäs  $10 ^\circ\text{C}$  ulkolämpötilan ollessa kylmimmillään.

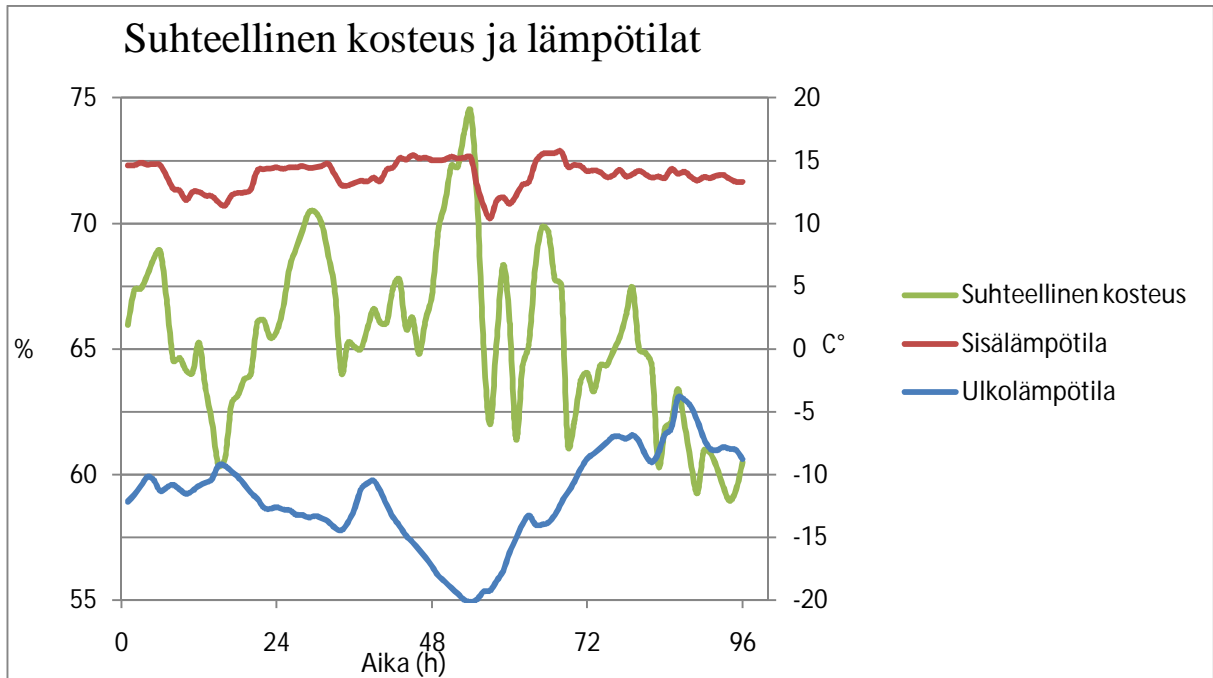
Hiilidioksidipitoisuus on suurimmillaan silloin, kun ulkolämpötila on kylmimmillään. Pitoisuus on tällöin lähes 3300 ppm. Ulkolämpötilan lauhtuessa myös hiilidioksidipitoisuus laskee aina lähes 2200 ppm asti.

Olosuhteet eivät ole täydelliset, koska hiilidioksidipitoisuus on korkea ylittäen hyväksyttävän 3000 ppm rajan. Lisäksi sisälämpötila on korkeimmillaan lähestulkoon 16 °C. Kovalla pakkasella sisälämpötila laskee tosin 10 °C.



**Kuva 37. Navetan hiilidioksidipitoisuus ennen automaattista säätöä**

Kuvassa 38 on esitelty navetan sisäilman suhteellinen kosteus, sisä- ja ulkolämpötilat samalla aikajaksolla kuin edellisessä kuvassa. Suhteellinen kosteus on korkeimmillaan lähes 74 %. Tällöin ulkolämpötila on -20 °C.

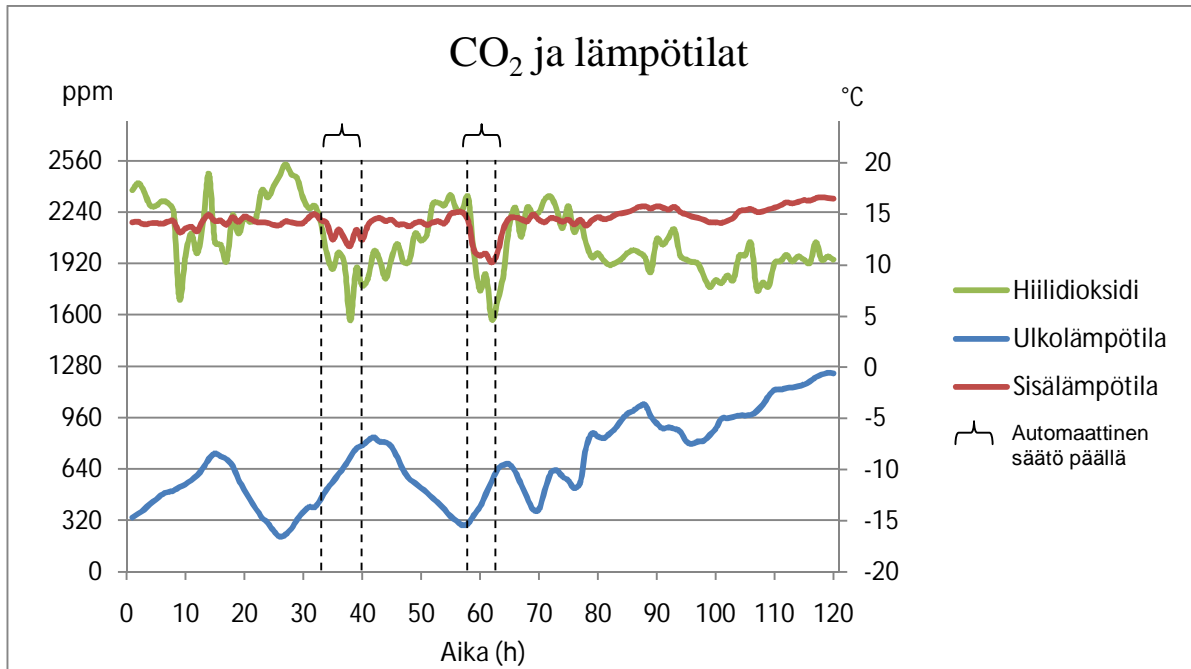


Kuva 38. Navetan suhteellinen kosteus ennen automaattista säätöä

### 5.2.2 Tulokset alkuperäisen säädön aikana

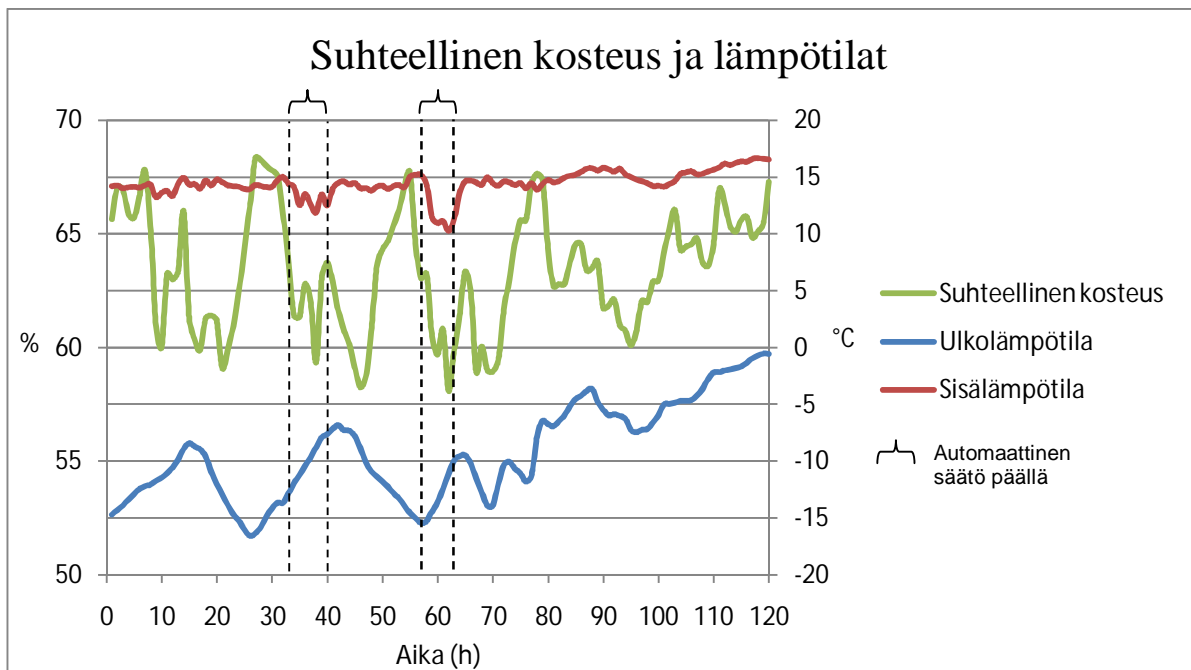
Mittaukset on tehty 2010 helmikuun ja maaliskuun vaihteessa. Kuvissa 39 ja 40 on esiteltyä hiilidioksidipitoisuudet ja suhteellinen kosteus navetassa neljän peräkkäisen vuorokauden ajalta. Kuvissa on myös sisä- ja ulkolämpötilat. Luukut olivat jäässä, joten luukut eivät auenneet kuin pari senttimetriä.

Automaattinen säätö on siis päällä 33–40 sekä 57–63 tunnin kohdalla. Tämän huomaa sisälämpötilojen alenemisella. Myös hiilidioksidipitoisuudet ja suhteellinen kosteus tekevät notkahduksen edellä mainituissa ajankohdissa. Sisälämpötila pysyy suhteellisen tasaisena automaattisen säädön aikana, mutta alle tavoitetun minimilämpötilan jälkimmäisellä jaksolla. Hiilidioksidipitoisuus laskee hyvin automaattisen säädön aikana.



**Kuva 39.** Navetan hiilidioksidipitoisuus alkuperäisen automaattisäädön ollessa päällä päiväsaikaan

Suhteellinen kosteus nousee nopeasti huippuunsa, kun luukut laitetaan yöksi kiinni (Kuva 40). Ulkoilman lauhtuessa myös suhteellinen kosteus laskee ja sisälämpötila nousee.



**Kuva 40.** Navetan suhteellinen kosteus alkuperäisen automaattisäädön ollessa päällä päiväsaikaan



Taulukossa 6 on esiteltynä navetan olosuhteet ilman säätöä ja alkuperäisen säädön aikana. Sääolot ovat kummassakin tapauksessa samankaltaiset ja reilusti pakkasen puolella. Keskiarvoisesti navetan sisälämpötila on noin 12 °C eli tavoite minimilämpötilan verran alkuperäisessä säädössä. Hajonta on kuitenkin lähestulkoon 2 °C. Suurin lämpötila ylittää tavoite maksimiarvon ja pienin lämpötila alittaa tavoite minimiarvon. Ilman säätöä navetan sisälämpötila on korkeimmillaan 15 °C.

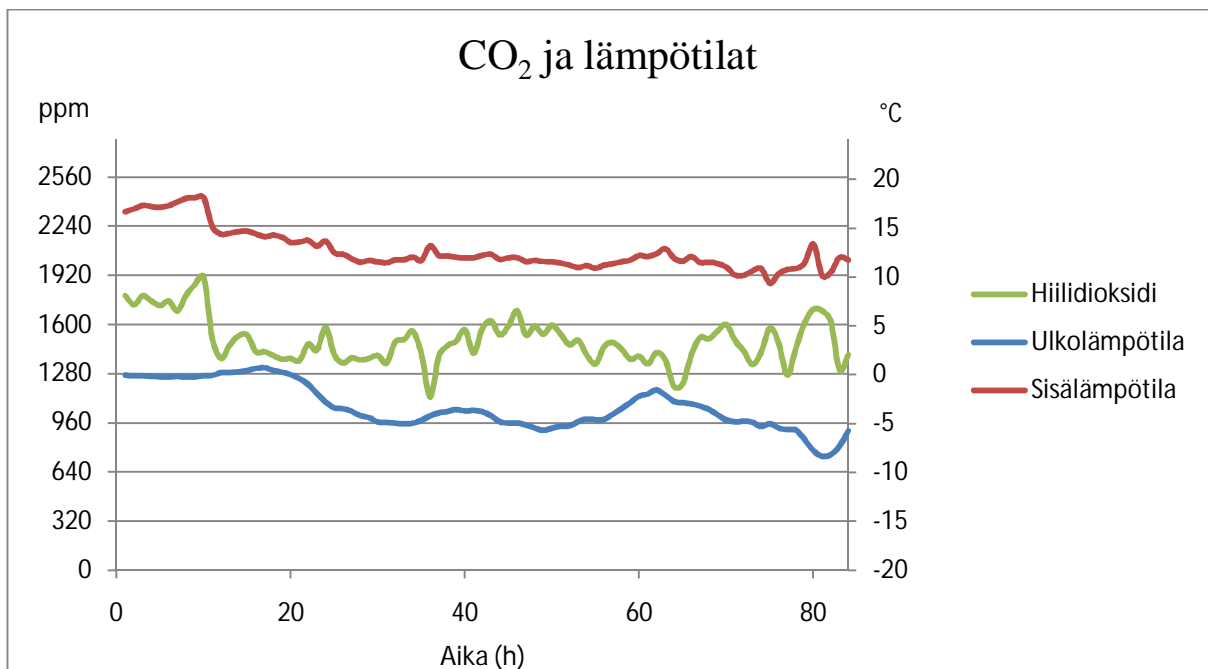
Hiilidioksidipitoisuus on alkuperäisessä säädössä pienempää verrattuna ilman säätöä olevaan arvoon. Koska luukut ovat täysin kiinni ilman säätöä, hiilidioksidipitoisuus nousee korkealle. Suhteellisessa kosteudessa ei ole merkittävää eroa näiden kahden tapauksen välillä.

**Taulukko 6. Navetan olosuhteet ilman säätöä ja alkuperäisen säädön aikana, kun sääolot ovat reilusti pakkasen puolella**

	<b>Ilman säätöä</b>	<b>Alkuperäinen säätö</b>
<b>Sisälämpötila (°C)</b>		
-keskiarvo	14,5	12,1
-hajonta	0,3	1,9
-suurin	15	15,2
-pienin	14,2	10,3
<b>Ulkolämpötila (°C)</b>		
-keskiarvo	-12,1	-13,2
-hajonta	1,5	2,1
-suurin	-10,2	-9,9
-pienin	-13,9	-15,4
<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>		
-keskiarvo	2249	1917
-hajonta	82	286
-suurin	2337	2332
-pienin	2086	1572
<b>RH (%)</b>		
-keskiarvo	60,1	60,8
-hajonta	1,5	1,9
-suurin	62,6	63,3
-pienin	59	58,1

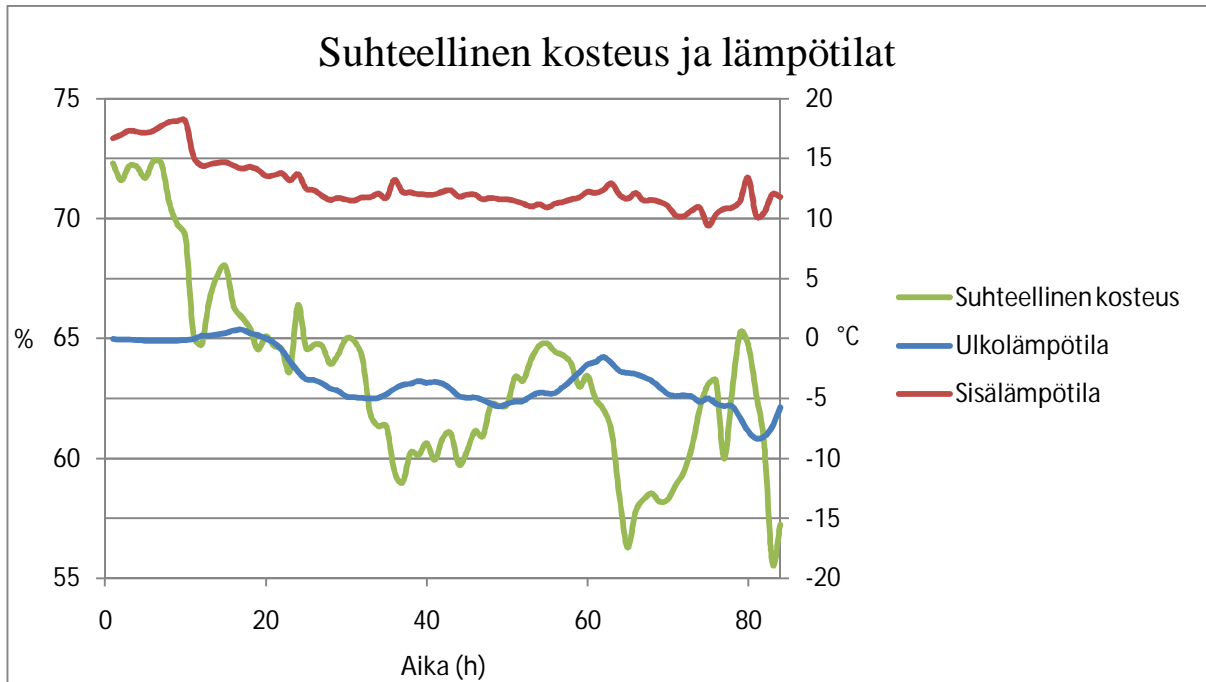
Kuvissa 41 ja 42 on esiteltynä navetan hiilidioksidipitoisuus ja suhteellinen kosteus, kun luukkujen alkuperäinen automaattisäätö oli käytössä myös yöaikaan. Toisen puolen luukut eivät olleet auki, koska siellä puolen lehmiä on kytketty parsiin ja niihin olisi kohdistunut liian suuri vedontunne.

Hiilidioksidipitoisuus pysyy suhteellisen tasaisena koko mittausjakson ajan (Kuva 41). Sisälämpötila on alimmillaan noin 9 °C eli alle tavoitelämpötilan. Jos myös toisen puolen luukut olisivat olleet automaattisella säädöllä, niin navetan sisälämpötila olisi ollut vieläkin viileämpi. Muuten sisälämpötila pysyttelee tasaisesti lähellä tavoitetun minimilämpötilan.



**Kuva 41.** Navetan hiilidioksidipitoisuus alkuperäisen automaattisäädön ollessa päällä jatkuvasti

Suhteellinen kosteus pysyy lähes koko automaattisen säädön ajan alle 65 %:n (Kuva 42). Kuvan 35 kaltaisia piikkejä ei ole havaittavissa.



**Kuva 42. Navetan suhteellinen kosteus alkuperäisen automaattisäädön ollessa päällä jatkuvasti**

Taulukossa 7 on esiteltyä navetan olosuhteet ilman säätöä ja alkuperäisen säädön aikana. Ulkolämpötila on molemmissa tapauksissa lähes 0 °C. Ilman säätöä navetan sisälämpötila on korkea, yli 16 °C. Hiilidioksidipitoisuus on myös suurempi ilman säätöä kuin alkuperäisen säädön aikana. Suhteellisessa kosteudessa ei ole merkittäviä eroja ilman säätöä ja alkuperäisen säädön aikana.

Alkuperäisessä säädössä sisälämpötila ylittää paikoin tavoite maksimilämpötilan. Verrattuna kylmempiin ulkolämpötiloihin (Taulukko 6), alkuperäinen säätö toimii huonommin lauhemmillä ulkolämpötiloilla. Hiilidioksidipitoisuus on alempi taulukon 7 alkuperäisessä säädössä verrattuna taulukon 6 arvoon. Tämä johtuu suuremmasta ilmanvaihdon tarpeesta, kun ulkolämpötila on lähellä 0 °C.

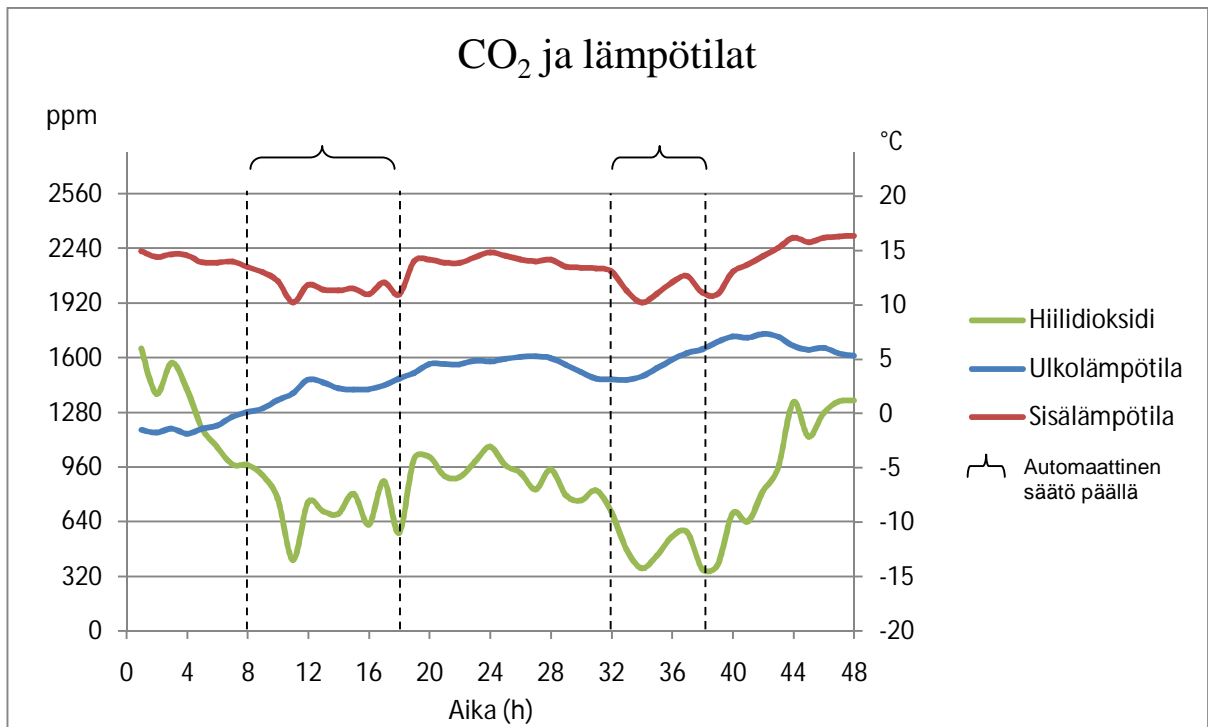
**Taulukko 7. Navetan olosuhteet ilman säätöä ja alkuperäisen säädön aikana, kun ulkolämpötila on lähellä 0 °C**

	<b>Ilman säätöä</b>	<b>Alkuperäinen säätö</b>
<b>Sisälämpötila (°C)</b>		
-keskiarvo	16,2	14,1
-hajonta	0,4	0,5
-suurin	16,7	14,7
-pienin	15,5	13,2
<b>Ulkolämpötila (°C)</b>		
-keskiarvo	-1,6	0
-hajonta	0,7	0,8
-suurin	-0,6	0,7
-pienin	-2,8	-1,9
<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>		
-keskiarvo	1939	1430
-hajonta	62	58
-suurin	2052	1530
-pienin	1776	1365
<b>RH (%)</b>		
-keskiarvo	65,5	65,6
-hajonta	1	1,3
-suurin	67,3	68
-pienin	63,6	63,7

### 5.2.3 Tulokset uuden säädön aikana

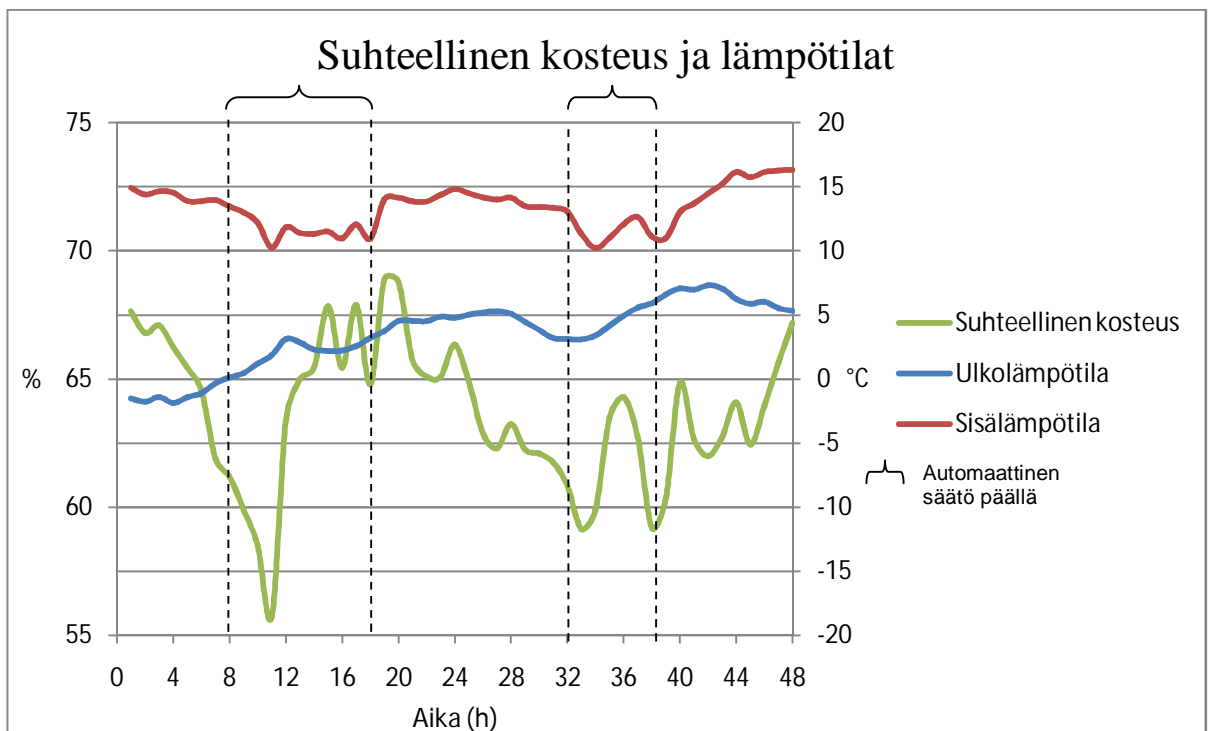
Mittaukset on tehty 2010 maaliskuu- ja huhtikuun vaihteessa. Kuvissa 43 ja 44 automaattinen säätö on päällä molemmilla puolilla 8-18 sekä 32–38 tunnin kohdalla. Muina aikoina automaattinen säätö on päällä vain toisen puolen luukuilla ja vastapuolen luukut ovat täysin kiinni.

Navetan lämpötila laskee hieman alle 12 °C säädön ollessa päällä mutta pysyy aika hyvin tasaisena. Ulkolämpötila nousee 33–39 tunnin kohdalla, mikä näkyy myös sisälämpötilan nousuna.



**Kuva 43.** Navetan hiilidioksidipitoisuus uuden automaattisäädön ollessa päällä päiväsaikaan

Suhteellinen kosteus kasvaa, kun automaattinen säätö on päällä molemmilla puolilla (Kuva 44). Tämä johtuu siitä, että mittauksien aikana ulkona satoi vettä.



**Kuva 44.** Navetan suhteellinen kosteus uuden automaattisäädön ollessa päällä päiväsaikaan

Taulukossa 8 on esiteltynä navetan olosuhteet, kun uusi automaattinen säätö on käytössä. Taulukossa on myös esiteltynä olosuhteet, kun automaattinen säätö on ollut päällä vain toisella puolella navettaa. Molemmissa tapauksissa ulkolämpötila on melkein sama vaihdellen -0,3 – 7,3 °C. Uudessa säädössä sisälämpötila pysyttelee hyvin asetettujen rajojen sisällä, kunhan vain molempien puolien luukut ovat käytössä. Kun käytössä on vain toisen puolen luukkurivi, sisälämpötila nousee korkeimmillaan 16,3 °C. Myös hiilidioksidipitoisuus nousee korkeammalle, kun toisen puolen luukut ovat kiinni.

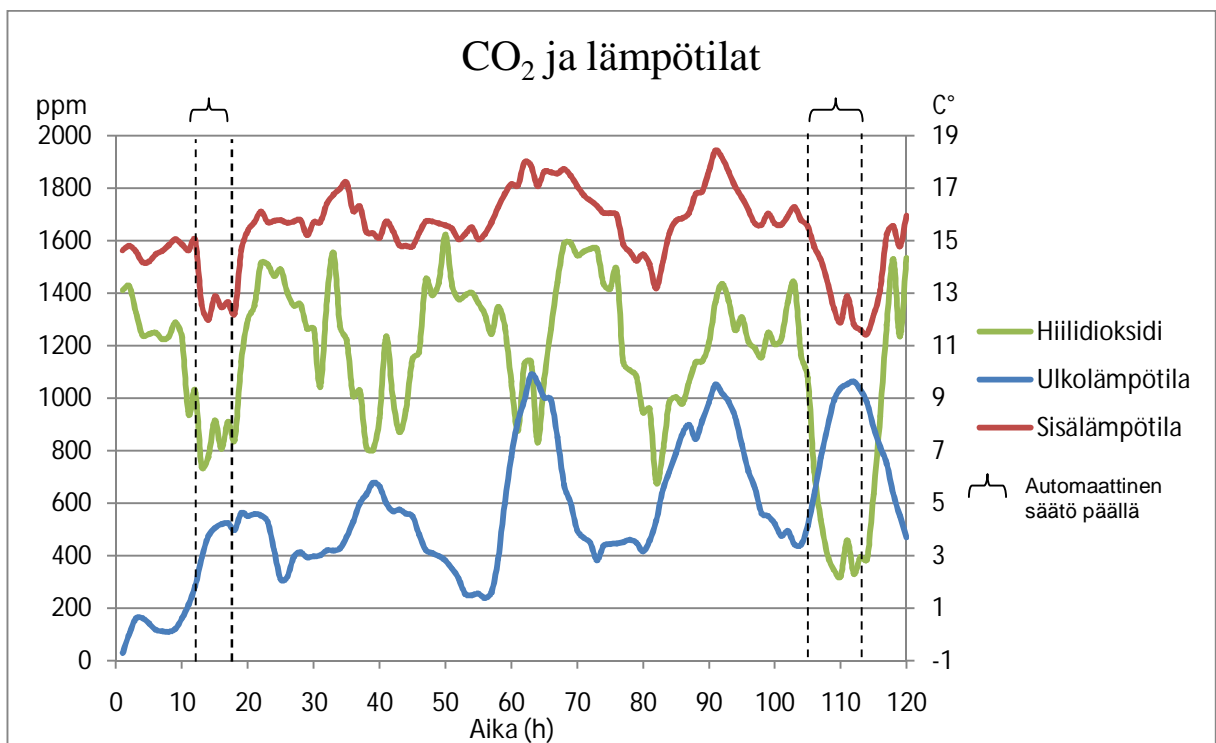
Suhteellinen kosteus pysyttelee molemmissa tapauksissa aika lailla samoissa arvoissa. Suhteellinen kosteus on keskimääräisesti hieman pienempi, kun käytössä on molemmat luukku rivit. Toisaalta, kun molemmat luukkurivit olivat automaattisella säädöllä, ulkona satoi vettä. Tämä nostaa hieman suhteellista kosteutta navetan sisällä.

**Taulukko 8. Navetan olosuhteet uuden säädön aikana, kun säätö on käytössä molemmilla puolilla ja vain toisella puolella.**

	<b>Uusi säätö</b>	<b>Uusi säätö (vain toisen puolen luukut)</b>
<b>Sisälämpötila (°C)</b>		
-keskiarvo	11,9	14,6
-hajonta	1,1	1
-suurin	14	16,3
-pienin	10,2	13,4
<b>Ulkolämpötila (°C)</b>		
-keskiarvo	3	5,3
-hajonta	1,8	1,1
-suurin	6,6	7,3
-pienin	-0,3	3,2
<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>		
-keskiarvo	662	989
-hajonta	212	206
-suurin	1009	1348
-pienin	360	640
<b>RH (%)</b>		
-keskiarvo	62,7	64,1
-hajonta	3,5	2
-suurin	68,9	68,8
-pienin	55,8	61,8

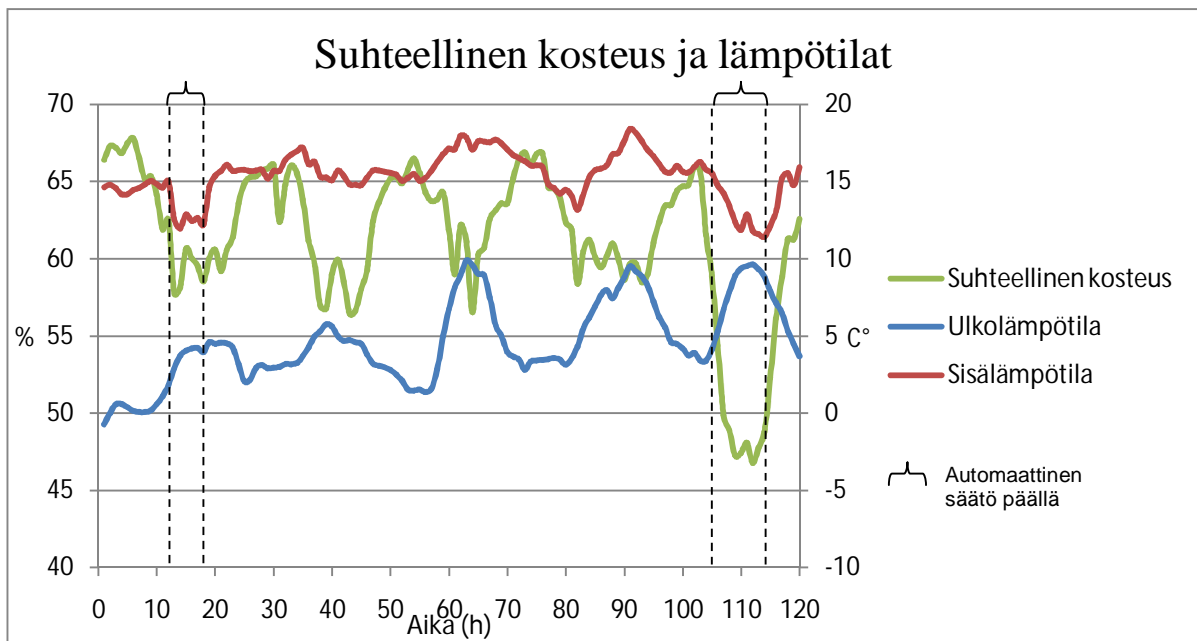
Kuvassa 45 on esiteltynä navetan hiilidioksidipitoisuus viitenä peräkkäisenä päivänä. Automaattinen säätö on päällä molemmilla puolilla 12–18 ja 105–114 tunnin kohdalla. Muina aikoina automaattinen säätö on päällä vain toisen puolen luukuilla ja vastapuolen luukut ovat täysin kiinni. Sisälämpötila pysyttelee 12–18 tunnin välillä tasaisesti lähellä 12 C°. Alin lämpötila tällöin on noin 12 C° ja ylin 12,9 C°. Myös 105–114 tunnin kohdalla pysytään aika lähellä tavoitelämpötilaa, mutta lämpötila ei pysy aivan yhtä tasaisena kuin edellä. Minim- ja maksimilämpötilat ovat kuitenkin samat kuin 12–18 tunnin kohdalla.

Hiilidioksidipitoisuus putoaa voimakkaasti automaattisen säädön ollessa päällä. Kun toisen puolen säätö ei ole päällä 115–104 tunnin kohdalla, hiilidioksidipitoisuus nousee taas korkeammalle. Hiilidioksidipitoisuus laskee alas välillä vaikka automaattinen säätö ei olekaan päällä molemmilla puolilla. Tämä johtunee navetan yleisestä liikenteestä, jolloin joku ovi on auki pidemmän aikaa esim. täyttöpöydän täyttämisen tai kuivikkeiden sisälle noston aikana.



**Kuva 45.** Navetan hiilidioksidipitoisuus viitenä peräkkäisenä päivänä uuden automaattisäädön ollessa päällä

Kuvassa 46 on esiteltynä navetan suhteellinen kosteus. Automaattinen säätö on ollut päällä samalla tavalla kuin edellä (Kuva 45). Suhteellinen kosteus laskee, kun automaattinen säätö on päällä molemmilla puolilla.



**Kuva 46.** Navetan suhteellinen kosteus viitenä peräkkäisenä päivänä uuden automaattisäädön ollessa päällä

Taulukossa 9 on esiteltynä navetan olosuhteet, kun uusi automaattinen säätö on ollut käytössä molemmilla puolilla ja vain toisella puolella navettaa. Ulkolämpötila on molemmissa tapauksissa samaa luokkaa vaihdellen 2,9 – 9,9 °C. Sisälämpötila pysyttelee hyvin annettujen rajojen sisällä, kun molemmat luukkurivit ovat automaattisella säädöllä. Kun toisen puolen luukkurivi on kokonaan kiinni, sisälämpötila nousee aina 18 °C asti.

Hiilidioksidipitoisuus on lähestulkoon kaksi kertaa pienempi silloin, kun molemmat luukkurivit ovat automaattisella säädöllä. Suhteellinen kosteus on 9,5 prosenttiyksikköä pienempi silloin, kun molemmat luukkurivit ovat automaattisella säädöllä.



**Taulukko 9. Navetan olosuhteet uuden säädön aikana, kun säätö käytössä molemmilla puolilla ja vain toisella puolella**

	<b>Uusi säätö</b>	<b>Uusi säätö (vain toisen puolen luukut)</b>
<b>Sisälämpötila (°C)</b>		
-keskiarvo	12,3	16,7
-hajonta	0,6	1
-suurin	13,4	18
-pienin	11,4	15,2
<b>Ulkolämpötila (°C)</b>		
-keskiarvo	6,7	6,2
-hajonta	2,7	3
-suurin	9,6	9,9
-pienin	2,9	2,9
<b>CO<sub>2</sub> (ppm)</b>		
-keskiarvo	590	1177
-hajonta	234	186
-suurin	915	1442
-pienin	320	832
<b>RH (%)</b>		56,6
-keskiarvo	53	62,5
-hajonta	5,7	2,9
-suurin	60,7	66,1
-pienin	46,8	58,1

#### **5.2.4 Yhteenveto tuloksista**

Taulukossa 10 on esiteltynä mitattujen olosuhteiden keskiarvot ja hajonnat automaattisten säätöjen aikana ja ilman, että säätö olisi ollut päällä. Keskiarvoisesti lähimmäksi tavoitearvoa päästiin uudella säädöllä. Myös vanhalla säädöllä päästiin lähelle tavoitearvoa, mutta hajonta oli suurta. Myös hiilidioksidipitoisuudessa ja suhteellisessa kosteudessa päästiin matalampiin arvoihin keskiarvoisesti uudella säädöllä. Suhteellisessa kosteudessa oli suurin hajonta uudella säädöllä.

Taulukko 10. Yhteenveto navetan olosuhteista tutkimuksen aikana

	Ilman säättöä	Alkuperäinen säättö	Uusi säättö
<b>Sisälämpötila (°C)</b>			
-Keskiarvo	14,7	12,7	12,3
-Hajonta	1,7	2,01	1,2
-Suurin	18,2	18,1	15,6
-Pienin	10,4	9,4	10,2
<b>Ulkolämpötila (°C)</b>			
-Keskiarvo	-7,6	-4,5	4,5
-Hajonta	5,9	3,77	2,7
-Suurin	0,7	0,7	9,6
-Pienin	-20,1	-15,4	0,1
<b>Hiilidioksidipitoisuus</b>			
-Keskiarvo	2225	1557	644
-Hajonta	553	219	224
-Suurin	3277	2332	1078
-Pienin	812	1127	320
<b>Suhteellinen kosteus</b>			
-Keskiarvo	65,4	63,2	58,3
-Hajonta	3,8	3,8	6,4
-Suurin	74,5	72,4	67,9
-Pienin	55,8	55,7	46,8

Alkuperäisellä säädöllä sisälämpötila kävi hetkellisesti 9,4 °C mutta ulkolämpötila oli tällöin -5 °C. Tosin -15 °C ulkolämpötilassa navetan sisälämpötila laski vain 10 °C. Uudella säädöllä alin sisälämpötila oli 10,2 °C ja ulkolämpötila oli tällöin noin 2 °C. Tämän jälkeen lämpötila nousi lähelle 12 °C pysyen tasaisena loppuun saakka. Ylimpien lämpötilojen kohdalla säätimet tulivat vasta päälle eivätkä luukut olleet vielä ehtineet säätyä kohdalleen.

Ilman säättöä navetan sisälämpötila kohosi yli 18 °C, kun ulkolämpötila oli tällöin lähellä 0 °C. Myös hiilidioksidipitoisuus kohosi korkealle ilman säättöä. Suhteellinen kosteus oli ilman säättöä samaa luokkaa kuin alkuperäisen säädön aikana.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ennen automaattista säätöä navetan olosuhteet olivat huonot, kuten kuvasta 36 voidaan todeta. Syynä tähän on se, että luukut olivat lähes jatkuvasti täysin kiinni. Kun luukut ovat kiinni, sisälämpötila sekä hiilidioksidipitoisuus ovat korkealla. Myös kosteus on suurempaa luukkujen ollessa kiinni (Taulukko 10.). Parempaan ilman laatuun olisi päästy jo, kun luukut olisivat olleet auki 3,5 cm.

Alkuperäisen eli puhaltimien pyörimisnopeuteen perustuvan säädön aikana sisälämpötila pysyi tasaisena mutta alle tavoitelämpötilan. Huomioitavaa on se, että tällöin käytössä olivat vain toisen puolen luukut. Jos molemmat puolet olisivat olleet automaattisella säädöllä, sisälämpötila olisi laskenut vieläkin alemmaksi.

Uuden eli lämpötilaeroihin perustuvan säädön aikana sisälämpötila pysyi myös tasaisena ja lähellä tavoitelämpötilaa. Kun toisen puolen säätö ei ollut päällä, niin hiilidioksidipitoisuus nousi korkealle ja sisälämpötila nousi yli tavoitteeksi asetetun maksimilämpötilan. Jos ulkolämpötila olisi ollut reippaasti pakkasen puolella, niin tavoite sisälämpötilaan olisi päästy vaikka toisen puolen luukut olikin täysin kiinni.

Kun ulkolämpötila on 0 C° tai enemmän, yhdellä luukkurivillä ei pystytä vaihtamaan tarpeeksi ilmaa. Tällöin sisälämpötila on huomattavasti ylintä tavoitelämpötilaa korkeampi ja hiilidioksidipitoisuus on myös suurta. Myös kosteus kasvaa navetan sisällä, jos ilmaa ei vaihdeta tarpeeksi. Pakkaskaudella riittää, kun käytössä on vain toinen luukkurivi.

Tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, koska alkuperäisen säädön aikana ulkoilma oli kylmempää kuin uuden säädön aikana. Molemmilla säädöillä päästiin kuitenkin keskiarvoisesti lähelle tavoitelämpötilaa. Sisälämpötila pysyi molemmissa säädöissä tasaisena. Alkuperäinen säätö on hieman liian tehokas talvikaudella, koska silloin päästiin alle tavoitelämpötilan vaikka käytössä oli vain toisen puolen luukut.

Koska uudella säädöllä päästiin lähelle tavoitelämpötilaa lämpimimmillä säillä, voidaan päätellä, että se olisi toiminut myös viileämmillä säillä. Tällöin luukkuja tarvitsee avata vähemmän päästäkseen tavoitelämpötilaan ja kovalla pakkasella riittää jo, että käytössä on

vain toisen puolen luukut. Kaasupitoisuudet tosin kasvavat kovalla pakkasella pienemmän ilmanvaihtotarpeen vuoksi, mutta sille ei mahda mitään jos ei sitten käytä lisälämpöä.

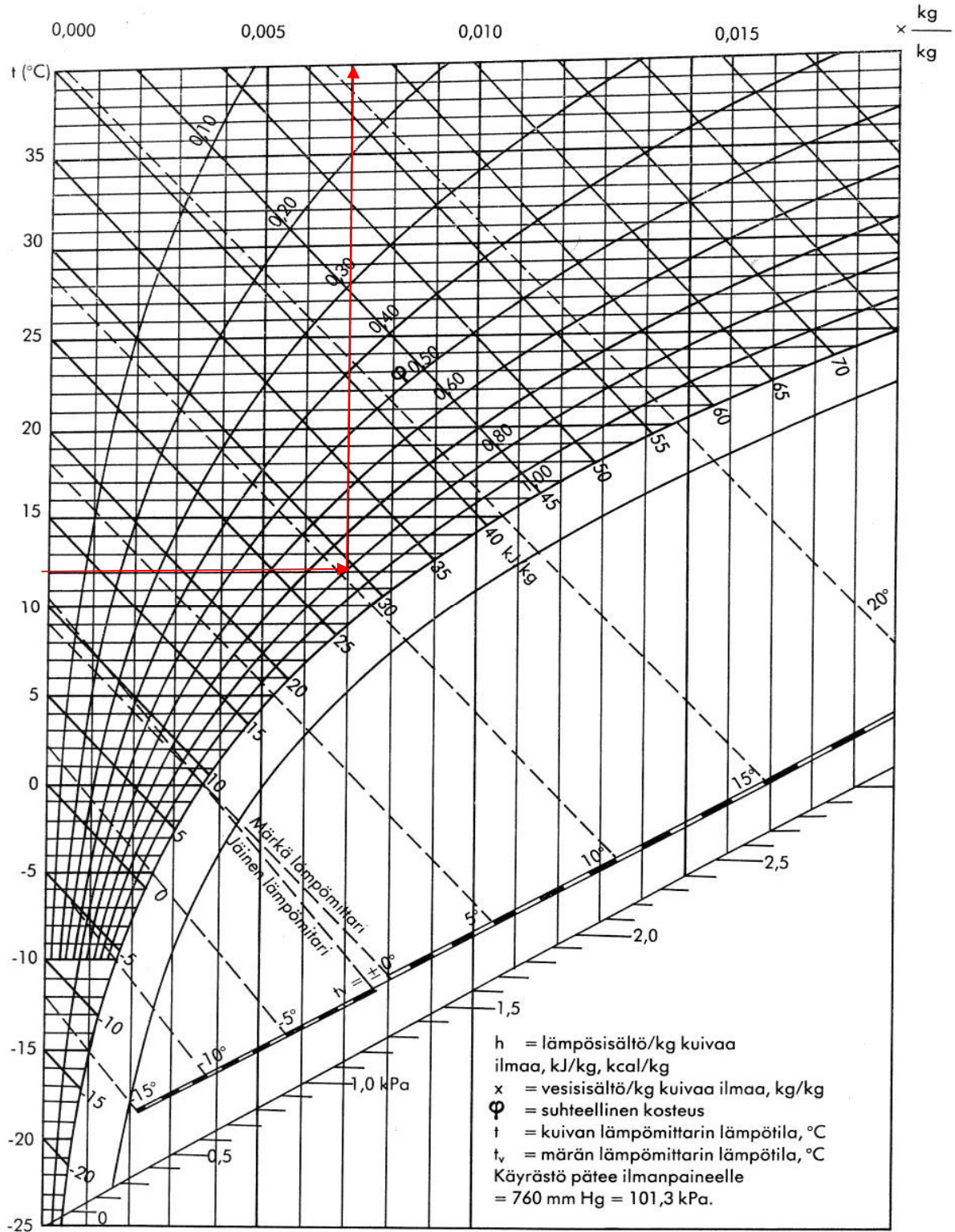
Alussa asetetut työn tavoitteet täyttyivät ja lämpötilaeroihin perustuva automaattinen tuloilmaluukkujen säätöjärjestelmä saatiin toteutettua. Sisälämpötila pysytteli aika lähellä asetettujen rajojen.

1. Toteutettiin lämpötilaeroihin perustuva automaattinen tuloilmaluukkujen säätöjärjestelmä
2. Sisälämpötila pysyi alle tavoitteeksi asetetun maksimiarvon mutta meni hieman alle tavoitteeksi asetetun minimiarvon
3. Ulkolämpötila tuli otettua huomioon laskettaessa tuloilmaluukun kokoa
4. Tuuli huomioitiin logiikassa mutta mittauksien aikana ei tuullut riittävästi

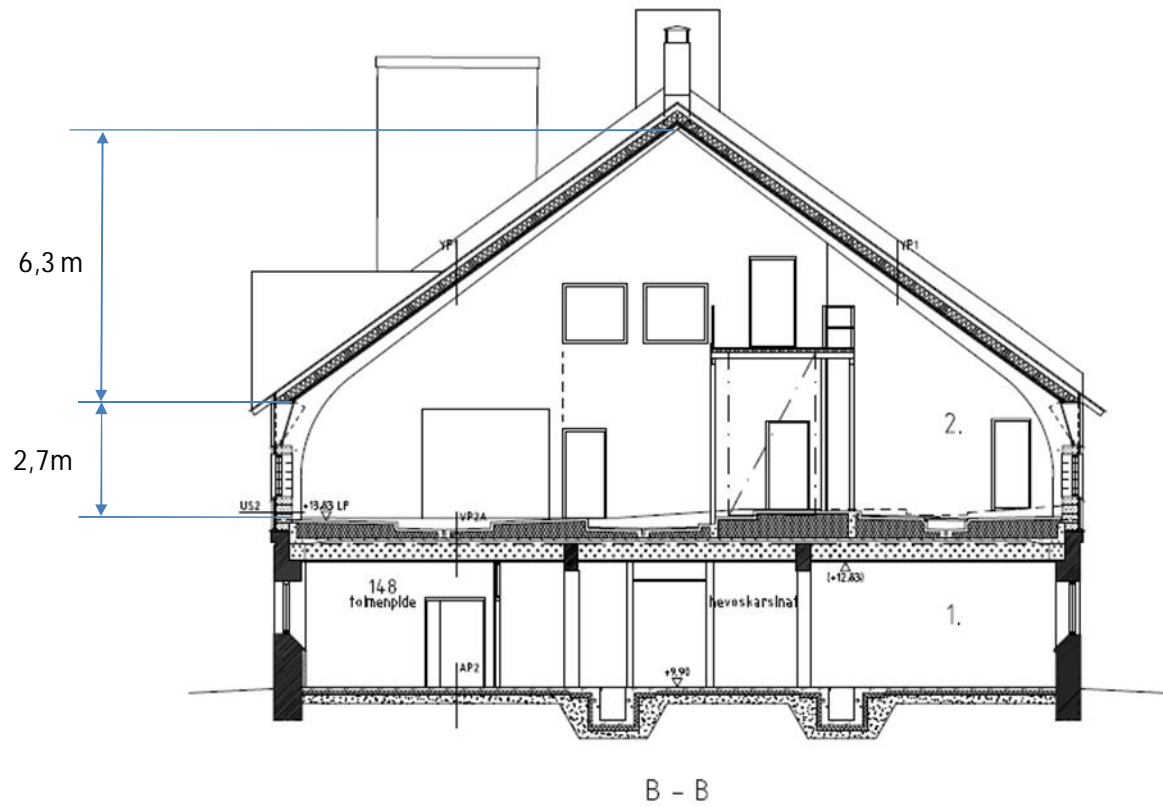
# LIITTEET

## Liite 1. Mollier-käyrästä

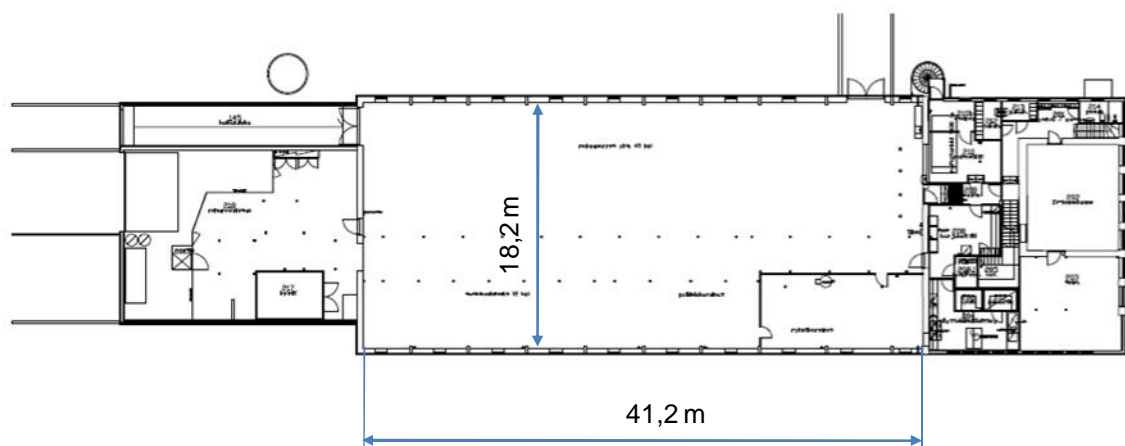
### Kostean ilman Mollier-käyrästä



Liite 2. Viikin navetan mitat



Liite 3. Viikin navetan pohjapiirustus



## LÄHTEET

- Anon 1987. Eläinsuojien ilmanvaihto. Maatalouden sähkönkäyttö. Maatalouskeskusten liitto.
- Anon 1988. Sää ja maatalous. . Maatalouskeskusten Liiton julkaisuja n:o 774. Tieto tuottamaan 54
- Anon 1991. Navetan korjaaminen: Lannankäsittely, ilmanvaihto. Maatalouskeskusten liiton julkaisuja nro. 815. s. 12-14, 18-20.
- Anon 1998. MMM:n rakentamismääräykset ja – ohjeet. C2.2: Maatalouden tuotantorakennusten lämpöhuolto ja huoneilmasto
- Anon 2002. Nauta – ja sikatilan olosuhdeopas. Maaseutukeskusten liiton julkaisuja nro 979. Tieto tuottamaan 97.
- Bruce, J. 1999. CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume II: Animal Production & Aquacultural Engineering. s. 31–87.
- Clark, J. 1981. Environmental Aspects of Housing for Animal Production. s. 331–368.
- Haahtela, T., Nordman, H. & Talikka, M. 1988. Sisäilma ja terveys.
- Hautala, M. 2004. Fysiikkaa pellosta pöytään ja takaisin peltoon. Maa- ja kotitalousteknologian laitoksen julkaisuja 16.
- Heikkinen, J., Heimonen, I., Kivinen, T., Mattila, K. & Teye, F. 2006. Lämpöeristetyn verhoseinäisen lypsykarjapihaton ilmanvaihdon toimivuus. MTT:n selvityksiä nro 119.
- Jolanki, R., Karjalainen, A., Kauppinen, T., Mäkinen, I., Palo, L. & Saalo, A. 2008. Ammattitaudit ja ammattitautiepäilyt 2006. Työterveyslaitos.

Kapuinen, P. & Karhunen, J. 1988. Pienten pihatoiden ilmanvaihdon erityisvaatimukset.

Vakolan tutkimusselostus Nro 51.

Karhunen, J. & Tuunanen, L. 1984. Eläinsuojien ilmanvaihdon mitoitus. Vakolan tutkimusselostus Nro 39.

Karhunen, J. & Tuunanen, L. 1986. Alipaineilmanvaihto kotieläinsuojissa. Vakolan tutkimusselostus Nro 44.

Karhunen, J. 1994. Itkupinta- tuloilmalaitteen vaikutus eläinsuojassa. Vakolan tiedote 64. s. 3-11.

Karttunen, H., Koistinen, J., Manner, O. & Saltikoff, E. 2002. Ilmakehä ja sää. Ursan julkaisuja 62. s. 254-259.

Kolki, O. 1969. Katsaus Suomen ilmastoon. Ilmatieteen laitoksen tiedonantoja N:o 18.

Müller, H-J. 2001. Bilanzmethoden zur Luftvolumenstromermittlung in frei gelüfteten Ställen.

Myllys, A. 1999. Naudan hyvä elämä. Helsingin yliopiston maaseudun tutkimus- ja koulutuskeskus. s. 31–39.

Sariola, J. 1994. Tuulen vaikutus tuloaukon toimintaan eläinsuojien ilmanvaihdossa. Pro gradu - tutkielma. Helsingin yliopisto. Maa – ja kotitalousteknologian laitos.

Seppänen, O. 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto.

Svedinger, S. Byggnader för jordbruket 2.

Tirkkonen, M. 1999. Tuotantoeläinten hyvinvointi. Maaseutukeskusten liiton julkaisuja nro 938. Tieto tuottamaan 81.